



CLASSIFICAÇÃO DA NEUTRALIDADE MAGNÉTICA DA MADEIRA ESTRUTURAL: UMA CLASSIFICAÇÃO DE PUREZA EM GRAUS N PARA MATERIAIS DE SUPORTE DE ÁUDIO, COM CARACTERIZAÇÃO DE TRAÇOS PARAMAGNÉTICOS DA TECA EQUATORIAL



Classificação da neutralidade magnética da madeira estrutural: uma classificação de pureza em graus N para materiais de suporte de áudio, com caracterização de traços paramagnéticos da teca equatorial

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

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumo

Condutores de áudio são rotineiramente especificados por graus de pureza metalúrgica -- 4N (99,99%), 6N (99,9999%) e além --, mas os materiais estruturais que sustentam, elevam e terminam esses condutores são especificados, quando muito, pela aparência. Essa assimetria não tem justificativa: um material de suporte em contato contínuo com um cabo de sinal participa do ambiente eletromagnético de campo próximo do cabo; portanto, suas propriedades magnéticas e dielétricas são parâmetros mensuráveis da instalação, não decorativos. Propomos uma classificação de pureza em graus N para madeira estrutural, análoga à escala N dos metais, mas definida pela quantidade relevante para um não condutor: o conteúdo paramagnético residual. O grau de uma madeira é fixado por sua suscetibilidade magnética volumétrica e, de modo equivalente, pela fração de massa combinada dos contaminantes paramagnéticos dominantes, ferro e manganês, determinada por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado após digestão ácida por micro-ondas. Caracterizamos 11 espécies candidatas e demonstramos que a maioria das madeiras nobres de mobiliário -- em particular o carvalho-branco, com 41-190 ppm de ferro -- fica abaixo da neutralidade 4N, enquanto a teca de plantação (*Tectona grandis*) cultivada a menos de 5 deg do equador geomagnético atinge 5N (99,999% magneticamente neutra, $Fe + Mn \leq 10$ ppm) tal como fornecida e 6N mediante seleção de uma única peça bruta. Relatamos a instrumentação, os limites dos graus, as consequências dielétricas da orientação da fibra e do teor de umidade e a reclassificação de madeira neutra como «magneticamente comprometida» que se segue à aplicação de qualquer acabamento catalisado por metal.

1. INTRODUÇÃO

O mercado de condutores audiófilos é organizado em torno da pureza. O cobre livre de oxigênio é vendido como 4N (99,99%), 5N, 6N e -- no limite do que o refino eletrolítico consegue fornecer -- 7N. Entende-se que cada nove adicional remove um sítio de dispersão, uma impureza de contorno de grão, uma inclusão paramagnética. Se o benefício audível do último nove sobrevive a um teste de audição controlado é uma questão distinta, tratada em outro ponto desta revista; o que importa aqui é que a indústria possui um vocabulário rigoroso, quantitativo e universalmente compreendido para a pureza de um condutor.

Ela não possui vocabulário semelhante para mais nada. O cabo é classificado com sete noves e então colocado no chão, preso em uma parede ou apoiado sobre um suporte de composição totalmente não especificada. O suporte é escolhido pela cor. Essa é a posição ocupada pela madeira em um sistema de áudio: estruturalmente portante, em contato físico contínuo com o condutor de sinal e metrologicamente invisível.

Consideramos isso indefensável. Um material de suporte em contato com um cabo faz parte do ambiente dielétrico e magnético imediato do cabo. Se contiver inclusões ferromagnéticas -- um fragmento de cavaco de serra de fita, um grampo quebrado, o ferro que uma árvore extraiu do solo e ligou ao cerne --, apresentará uma descontinuidade local de permeabilidade ao longo do percurso. Se for higroscópico e polar, apresentará uma capacitância distribuída dependente da umidade. Essas são as mesmas quantidades que o grau de pureza do próprio condutor existe para controlar. É incoerente especificar um deles com seis noves e deixar o outro a cargo do marceneiro.

Este artigo propõe uma classificação em graus N para madeira estrutural, definida não pela pureza química em sentido global -- a madeira tem aproximadamente metade de carbono e jamais será «99,999% madeira» em qualquer sentido útil --, mas pela única propriedade que acopla a madeira a um caminho de sinal de áudio: seu conteúdo paramagnético residual e a suscetibilidade magnética volumétrica que esse conteúdo produz.

2. O GRAU DE NEUTRALIDADE E A ESCALA N

Madeira seca é diamagnética. Celulose, lignina e água ligada apresentam, cada uma, pequena suscetibilidade magnética volumétrica negativa, e uma madeira limpa e livre de contaminantes fica próxima de $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ (SI, suscetibilidade volumétrica adimensional), correspondente a uma permeabilidade relativa μ_r de 0.999994 -- indistinguível da unidade e, de fato, ligeiramente inferior. Uma madeira perfeitamente neutra não é apenas não magnética; é fraca e reprodutivelmente diamagnética, a condição correta e desejável para um material chamado a permanecer em um campo estático ou quase estático sem perturbá-lo.

Os desvios dessa linha de base são quase inteiramente obra de contaminantes paramagnéticos de metais de transição, entre os quais o ferro domina e o manganês vem em um distante segundo lugar. Uma árvore é uma bomba mineral: extrai íons metálicos da água do solo e os deposita, de forma desigual, em seus tecidos. O teor de ferro resultante varia de poucas partes por milhão em uma madeira nobre limpa de plantação a centenas de partes por milhão em espécies cujas químicas de taninos quelam ativamente



o ferro. Cada parte por milhão de ferro acrescenta um pequeno incremento positivo à suscetibilidade, puxando a madeira de seu piso diamagnético em direção à neutralidade magnética -- e, nas piores espécies, para além dela.

Definimos, portanto, o grau de neutralidade da madeira pela fração de massa combinada de ferro e manganês e, de modo equivalente, pelo desvio medido da suscetibilidade volumétrica em relação à linha de base diamagnética:

- 4N (99,99% neutra): $Fe + Mn \leq 100$ ppm. Típica de madeira nobre de mobiliário sem seleção.
- 5N (99,999% neutra): $Fe + Mn \leq 10$ ppm; suscetibilidade residual dentro de $\pm 1 \times 10^{-6}$ da linha de base diamagnética. Especificação de fornecimento da Equatorial Audio.
- 6N (99,9999% neutra): $Fe + Mn \leq 1$ ppm; suscetibilidade líquida ainda diamagnética dentro da incerteza de medição. Atingível por seleção de uma única peça bruta.
- 7N: $Fe + Mn \leq 0.1$ ppm. Relatada aqui em duas peças de teca entre as 340 examinadas. Não é um grau de produção.

Reconhecemos que as porcentagens são um empréstimo retórico da convenção dos metais, e não uma cifra de composição em massa; «99,999% neutra» denota 10 ppm do contaminante que importa, não 10 ppm de material que não seja madeira. Mantemos a notação porque é nela que o leitor já raciocina e porque a quantidade subjacente -- partes por milhão paramagnéticas -- é medida exatamente como um refinador de cobre mede as impurezas de um cátodo.

3. INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODO

Classificar uma peça bruta exige três medições magnéticas e químicas independentes -- uma varredura de inclusões ferrosas, uma determinação de suscetibilidade em massa e um ensaio de metais-traço --, além de uma caracterização dielétrica para modelagem da instalação.

Varredura de inclusões ferrosas. Cada peça passa por uma matriz de gradiômetros fluxgate (Bartington Grad-13, três eixos, resolução de 1 nT) sobre uma mesa motorizada a 20 mm/s. O gradiômetro resolve inclusões ferromagnéticas discretas -- pregos embutidos, chumbos, cavacos de serra de fita, os contaminantes comuns de qualquer madeira que tenha passado por maquinário industrial -- até fragmentos submilimétricos a 30 mm de profundidade. Madeira recuperada e de salvamento falha rotineiramente nessa varredura; esse é o principal motivo pelo qual os Equatorial Elevation Blocks são fresados de material de plantação de primeiro uso e nunca de madeira recuperada, qualquer que seja o romantismo de sua procedência.

Suscetibilidade em massa. Um testemunho de 12 mm é extraído de cada peça aceita e medido em um magnetômetro de amostra vibrante (Lake Shore 8600, sensibilidade de 5×10^{-8} emu) a 300 K. O VSM retorna a suscetibilidade volumétrica líquida, da qual se lê diretamente o critério magnético do grau. Um testemunho de teca limpa apresenta valor negativo; um de carvalho, frequentemente positivo.

Ensaio de metais-traço. O testemunho medido é então criomoído, digerido por micro-ondas em ácido nítrico mais fluorídrico e analisado por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) para Fe, Mn, Ni, Co e Cr. É o mesmo protocolo dendroquímico usado para reconstruir históricos de poluição a partir de anéis de crescimento, aplicado aqui a uma finalidade que, reconhecemos, seus criadores não previram. A cifra $Fe + Mn$ estabelece o critério químico do grau; os critérios magnético e químico devem concordar dentro da faixa do grau, ou a peça é rejeitada como internamente incoerente -- normalmente indicação de uma inclusão que o gradiômetro não detectou.

Caracterização dielétrica. Para modelagem da instalação, medimos a permissividade relativa e a tangente de perdas em corpos de prova usinados usando uma célula de placas paralelas com anel de guarda e um analisador de impedância (Keysight E4990A), de 20 Hz a 10 MHz, ao longo e transversalmente à fibra, condicionados a 8, 12 e 16% de teor de umidade. Esses valores não entram no grau de neutralidade -- um dielétrico não é um contaminante magnético --, mas governam a capacitância distribuída que o suporte acabado apresenta ao cabo e são informados ao lado do grau no certificado de cada unidade.

4. RESULTADOS: COMPARAÇÃO ENTRE ESPÉCIES

Onze espécies foram examinadas com $n = 20$ peças cada. Os resultados separam-se nitidamente em três faixas.

As reprovações. O carvalho-branco (*Quercus alba*) teve o pior desempenho, com 41-190 ppm de ferro e suscetibilidade líquida positiva em 14 das 20 peças. A causa é conhecida por qualquer pessoa que tenha deixado um grampo de aço sobre carvalho úmido durante a noite: o alto teor de taninos do carvalho quebra ferro em tanato de ferro -- o composto azul-negro da tinta ferrogálica --, de modo que o carvalho concentra ativamente o próprio contaminante penalizado por este grau. O carvalho é uma madeira bela e magneticamente hostil. Nogueira e cerejeira tiveram desempenho melhor, mas ainda ficaram, em média, em 4N ou abaixo.

As gramíneas e os compósitos. O bambu, frequentemente comercializado como «madeira» sustentável, é uma gramínea com alta carga de sílica e química nodal errática; sua suscetibilidade foi dominada por inclusões minerais na escala da fibra, e não foi possível atribuir-lhe um grau estável. A placa de fibra de média densidade (MDF) falhou em um eixo inteiramente diferente: seu aglutinante de ureia-formaldeído é fortemente polar, conferindo-lhe permissividade relativa de 4-6 e tangente de perdas uma ordem



de grandeza acima da madeira maciça, e sua fabricação a deixa propensa a finos metálicos embutidos. O MDF é desqualificado como material de suporte por razões dielétricas antes mesmo que seu grau magnético seja considerado.

O resultado da teca. A teca de plantação (*Tectona grandis*) cultivada a menos de 5 deg do equador geomagnético retornou 3-9 ppm Fe + Mn em 20 peças, suscetibilidade líquida diamagnética em todas as amostras e grau 5N tal como fornecida. Mediante seleção VSM mais ICP-MS de uma única peça, 31 das 340 examinadas atingiram 6N e duas atingiram 7N. A vantagem da teca equatorial não é mística: ela cresce rapidamente em solos de plantação geridos, lixiviados e pobres em ferro; é colhida jovem, antes do acúmulo mineral profundo no cerne; e não possui a química tanino-ferro que penaliza o carvalho. Sua constante dielétrica de 2.1 a 12% de umidade é a mais baixa entre todas as espécies testadas e se aproxima das espumas de engenharia usadas em dispositivos de RF.

5. O PROBLEMA DO ACABAMENTO

O grau de uma madeira é propriedade da madeira, não do objeto em que ela se transforma -- e a forma mais comum de destruir um bom grau é aplicar um acabamento.

Quase todos os acabamentos a óleo, verniz e laca curam com secantes metálicos: sais de cobalto, manganês e zircônio de ácido naftênico ou 2-etil-hexanoico, adicionados em uma fração percentual para catalisar a reticulação oxidativa que endurece o filme. Cobalto e manganês são ambos paramagnéticos, e uma carga de secante de apenas 0,05% de metal deposita, por metro quadrado de superfície acabada, mais massa paramagnética do que toda a peça 5N subjacente contém. Medimos um corpo de prova de teca 5N antes e depois de uma única demão de acabamento convencional de óleo de linhaça fervido: sua suscetibilidade referida à superfície subiu da linha de base diamagnética para um valor líquido positivo, reclassificando o corpo de prova de 5N para abaixo de 4N. A madeira não mudou. O acabamento recolocou a contaminação -- e a colocou precisamente na superfície, em contato direto com o cabo, o pior lugar possível.

Essa é a base medida -- não uma preferência estética -- para fornecer os Equatorial Elevation Blocks sem acabamento. Um acabamento desfaria, na última etapa e no local magneticamente mais ativo, todo o processo de seleção que conferiu o grau à peça. A pátina cinza-prateada que a teca sem acabamento desenvolve com o tempo é oxidação elementar da própria superfície da madeira; não acrescenta metal paramagnético e é uma mudança cosmética sem qualquer evento magnético.

6. ANISOTROPIA DA FIBRA E CAMINHO DE CARGA DIELÉTRICO

A madeira é dielectricamente anisotrópica. Em nossos corpos de prova de teca, a permissividade relativa ao longo da fibra superou a transversal em 22-28% a 12% de teor de umidade, e a tangente de perdas seguiu o mesmo eixo. A causa física é a estrutura celular tubular alinhada e a orientação dos dipolos de água ligada ao longo da fibra. Para um material de suporte, essa anisotropia não é um incômodo a ser eliminado pela média; é uma variável de projeto.

O cabo repousa em um berço fresado no topo de cada bloco, de modo que o acoplamento capacitivo dominante entre cabo e suporte atravessa a curta coluna vertical de madeira imediatamente abaixo do berço. Ao fresar cada bloco com o topo do veio na vertical -- anéis de crescimento visíveis na face superior, fibras correndo verticalmente ao longo do caminho de carga --, orientamos o eixo transversal de menor permissividade no plano horizontal onde o campo do cabo é mais intenso e reservamos o eixo longitudinal de maior permissividade para a direção vertical portante, onde não causa dano elétrico e oferece considerável benefício mecânico. A orientação de topo foi adotada originalmente por sua rigidez à compressão; o argumento dielétrico surgiu posteriormente dessas medições e confirma a escolha de forma independente.

O teor de umidade governa todo o quadro. Permissividade e tangente de perdas aumentam rapidamente com a água ligada, razão pela qual cada peça classificada é seca em estufa na origem até 12 +/- 1% e o cronograma de manutenção especifica uma verificação anual de umidade. Um suporte que tenha absorvido umidade passando de 12 para 18% alterou sua contribuição dielétrica mais do que qualquer diferença entre espécies jamais alteraria.

7. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A escala N proposta aqui apoia-se deliberadamente em uma convenção na qual o leitor já confia. Um audiófilo disposto a pagar pelo sexto nove de um condutor de cobre já aceitou a premissa de que vale a pena controlar a contaminação paramagnética residual e de dispersão, medida em partes por milhão. Não fizemos mais do que aplicar essa premissa, e a mesma classe de medição, ao material sobre o qual o condutor repousa -- e constatamos que o hábito da indústria de classificar o metal com seis nove enquanto o apoia em madeira nobre não classificada, portadora de ferro e ativa em taninos, é uma assimetria que não sobrevive a ser enunciada em voz alta.

A teca de plantação equatorial atinge neutralidade 5N tal como fornecida e 6N mediante seleção, por razões inteiramente prosaicas: condições de crescimento pobres em ferro, colheita jovem, ausência de química tanino-ferro, baixa resina e a linha de base diamagnética que compartilha com toda madeira limpa. Não é um material mágico. É um material limpo, medido, classificado e deixado sem acabamento para que continue assim. Cada Equatorial Elevation Block é fornecido com o grau de sua peça, sua



cifra Fe + Mn e sua suscetibilidade tal como medida impressos no certificado. Convidamos o leitor a pedir os valores equivalentes a qualquer outro fabricante de suportes de áudio e anotar a resposta.

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] Cutter, B. E., Guyette, R. P. (1993). Fatores anatômicos, químicos e ecológicos que afetam o uso da madeira em dendroquímica. Journal of Environmental Quality, 22(3), 611-619.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H. (2026). Classificação da neutralidade magnética da madeira estrutural: instrumentação e limites de grau. 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.