



EL PROBLEMA DEL ACABADO: LOS SECANTES METÁLICOS COMO RECONTAMINACIÓN PARAMAGNÉTICA REFERIDA A LA SUPERFICIE DE MADERA CLASIFICADA POR NEUTRALIDAD



El problema del acabado: los secantes metálicos como recontaminación paramagnética referida a la superficie de madera clasificada por neutralidad

A. Bosque, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumen

Un estudio complementario estableció un grado de neutralidad para madera estructural, basado en el contenido paramagnético residual y expresado como fracción de masa combinada de hierro y manganeso respecto de una línea base diamagnética. Ese grado es propiedad de la troza en bruto. Este artículo estudia qué sucede cuando la troza recibe un acabado. Casi todos los aceites, barnices y lacas utilizados sobre madera son recubrimientos de curado oxidativo, endurecidos no por evaporación sino por reticulación autooxidativa de un aceite secante catalizada por metal; el catalizador es un metal de transición paramagnético -- casi siempre cobalto o manganeso -- depositado como sal carboxilato en una fracción porcentual de metal de la película húmeda. Como la película está en la superficie exterior, el catalizador se deposita precisamente donde el soporte toca el cable. Medimos la susceptibilidad magnética volumétrica referida a la superficie de probetas de teca 5N antes y después de seis tratamientos (control en bruto, aceite de tung puro sin secante, linaza cocida con octoato de Co, barniz marino alquídico con Co + Mn + Zr, acrílico al agua y aceite de cera dura) mediante magnetometría de muestra vibrante y SQUID, con perfilado en profundidad por descarga luminiscente para localizar el metal. Los acabados de curado oxidativo elevaron la susceptibilidad de los 50 micrómetros superiores desde la línea base diamagnética cercana a $\chi_v = -6 \times 10^{-6}$ hasta valores netos positivos, reclasificando todas las probetas catalizadas de 5N a menos de 4N; el metal quedó confinado a los 50-100 micrómetros superiores en todos los casos. La reciente tendencia a secantes sin cobalto (sustitutos de Mn, Fe y vanadio) elimina un problema toxicológico, pero no uno magnético, pues los sustitutos son también paramagnéticos. Concluimos que el único acabado que conserva un grado de neutralidad es ningún acabado, y que la pátina elemental superficial -- oxidación del esqueleto de carbono de la madera, que no añade metal -- es la única vía de envejecimiento cosmético compatible con el grado.

1. INTRODUCCIÓN

Una troza clasificada por neutralidad obtiene su grado mediante medición: una exploración de inclusiones ferrosas, una determinación de susceptibilidad global y un ensayo de metales traza coinciden en que la madera no contiene más de una cantidad especificada de hierro más manganeso en partes por millón y que su susceptibilidad volumétrica neta sigue siendo diamagnética. La teca de plantación ecuatorial alcanza 5N ($\text{Fe} + \text{Mn} \leq 10 \text{ ppm}$) tal como se entrega y 6N mediante selección de una sola troza. El grado es real, se certifica por unidad y es enteramente propiedad de la madera tal como sale del aserradero.

El estudio principal (Bosque, Ferro, Park & Tanaka, 2026) señaló en una única sección final que acabar la madera destruye el grado y presentó una medición antes y después en una probeta con linaza cocida. La observación merece más de un párrafo. La afirmación es contraintuitiva: cualquier trabajador de la madera entiende el acabado como protección, y la idea de que una capa protectora sea lo más destructivo magnéticamente que puede hacerse a un material de soporte contradice un siglo de práctica de taller. Si debe sostener una decisión de producto -- suministrar soportes sin acabado contra toda expectativa de un objeto de madera prémium -- hay que establecerla cuantitativamente en varias químicas de acabado y localizar en profundidad el metal contaminante.

Ese es el propósito de este artículo. Tratamos el acabado no como estética superficial, sino como una fina capa de metal catalizador depositada deliberadamente, y preguntamos cuánta masa paramagnética coloca exactamente y dónde. La respuesta es desfavorable al acabado en general y fatal para toda la clase de aceites y barnices de curado oxidativo que domina la ebanistería fina, por una razón que nada tiene que ver con la madera y todo con la química que endurece la película.

2. QUÍMICA DE LOS SECANTES Y CARGAS METÁLICAS

Un aceite secante -- linaza, tung y sus derivados alquídicos -- endurece por autooxidación: el oxígeno atmosférico extrae hidrógeno de las posiciones bis-alílicas de las cadenas de ácidos grasos insaturados, formando hidroperóxidos que se descomponen en radicales y reticulan el aceite hasta producir una película sólida. Sin ayuda, la reacción es lenta y tarda semanas. La aceleran los secantes: carboxilatos de metales de transición que catalizan tanto la formación como la descomposición del peróxido mediante un ciclo redox entre dos estados de oxidación. El secante primario clásico es el cobalto, que alterna entre Co(II) y Co(III); el manganeso (Mn(II)/Mn(III)) se comporta de forma similar. Son los metales secantes en profundidad y superficie. Se añaden circonio, calcio y zinc como secantes secundarios o auxiliares: no catalizan el paso redox, pero coordinan la película, mejoran el curado en profundidad y evitan la formación de piel superficial que causa el cobalto puro.

El metal se suministra como sal de un ácido orgánico de cadena larga -- históricamente ácido nafténico (naftenatos), hoy más comúnmente ácido 2-etilhexanoico (octoatos) -- elegido por su solubilidad en el aceite, no por ninguna propiedad del ion metálico aparte de su química redox. La sal se vende por contenido metálico: un naftenato de «6 % de cobalto» contiene un 6 % de cobalto en masa del secante líquido. En un recubrimiento terminado, el metal secante primario suele dosificarse entre el 0,02 y el 0,1 % respecto de los sólidos del aceite, con cobalto en el extremo inferior por su potencia y manganeso algo más alto.



Estas fracciones parecen insignificantes y lo son por unidad de masa de acabado. El problema es la densidad superficial, no la concentración. Una sola capa aplicada a brocha deposita unos 20-40 g de sólidos por metro cuadrado; al 0,05 % de cobalto son 10-20 mg de cobalto por metro cuadrado. Una troza de teca 5N con 10 ppm Fe + Mn contiene, en un bloque representativo de 200 x 60 x 45 mm y densidad de 650 kg/m³, unos 35 microgramos de metal contaminante clasificado en todo su volumen. El acabado de la cara superior deposita por sí solo varios cientos de microgramos de metal paramagnético -- un orden de magnitud más contaminante del permitido en toda la troza --, concentrado en una capa de micrómetros donde descansa el cable. El grado se definió para controlar partes por millón paramagnéticas; el acabado lo derrota no en unos puntos porcentuales, sino por un factor.

3. EXPERIMENTO: SUSCEPTIBILIDAD REFERIDA A LA SUPERFICIE ANTES Y DESPUÉS

Preparamos 36 probetas (60 x 60 x 8 mm) de una sola troza de teca ecuatorial 5N, verificada por ICP-MS en 7 ppm Fe + Mn, para que todas compartieran sustrato y cualquier diferencia posterior fuera atribuible únicamente al recubrimiento. Se asignaron grupos de seis a seis tratamientos: (A) control en bruto sin acabado; (B) aceite de tung puro sin secante, curado 21 días; (C) aceite de linaza cocido con octoato de cobalto (0,05 % Co); (D) barniz marino alquídico con paquete Co + Mn + Zr (0,04 % Co, 0,06 % Mn, 0,20 % Zr); (E) dispersión acrílica al agua (sin secante oxidativo); y (F) aceite de cera dura comercial (linaza y carnauba, catalizado con cobalto). Todos los tratamientos filmógenos se aplicaron en dos capas controladas de 30 g/m² por capa y se curaron hasta dureza de manipulación.

Como la contaminación es una capa superficial y la probeta un objeto a granel, medir la susceptibilidad de toda la muestra diluye la señal en 8 mm de madera diamagnética y la subestima. Por ello expresamos la susceptibilidad referida a la superficie de dos formas. Primero, la susceptibilidad volumétrica neta de toda la probeta mediante magnetómetro de muestra vibrante (Lake Shore 8600, 300 K), que captura el cambio integrado. Segundo, una cifra superficial obtenida de una lámina de 200 micrómetros paralela a la cara, cortada con micrómetro desde la superficie acabada y remontada, medida en un magnetómetro SQUID (Quantum Design MPMS3) con la sensibilidad requerida. El valor superficial es el que importa, porque corresponde a la madera que realmente toca el cable.

Los resultados son inequívocos. El control en bruto (A) mantuvo la línea base diamagnética: probeta completa $\chi_v = -5.9 \times 10^{-6}$, lámina superficial -6.1×10^{-6} . Los tratamientos sin secante (B, tung puro; E, acrílico) fueron estadísticamente indistinguibles del control a ambas escalas: aparte de la permitividad, no añaden metal paramagnético ni desplazan el grado. Los tres acabados catalizados de curado oxidativo (C, D, F) hicieron positiva la lámina superficial: linaza cocida hasta $+2.3 \times 10^{-6}$, aceite de cera dura hasta $+1.9 \times 10^{-6}$ y el barniz marino Co + Mn + Zr hasta $+4.8 \times 10^{-6}$. Referida a la capa que toca el cable, cada probeta catalizada cruzó de diamagnética a paramagnética y se reclasificó de 5N a menos de 4N. Los valores VSM de toda la probeta se movieron en la misma dirección, amortiguados por la dilución global; por eso una medición a granel de un soporte acabado halaga al acabado y una medición superficial lo condena.

4. PERFILADO EN PROFUNDIDAD: DÓNDE SE ENCUENTRA EL METAL

Un cambio de susceptibilidad indica que el metal está presente, pero no dónde. En un material de soporte, la distribución en profundidad no es incidental: el acoplamiento con el cable cae deprisa con la distancia y un contaminante enterrado a 2 mm es mucho menos relevante electromagnéticamente que la misma masa en los primeros micrómetros. Perfilamos las probetas mediante espectrometría de emisión óptica por descarga luminiscente de radiofrecuencia (GD-OES, Horiba GD-Profilier 2), que pulveriza la superficie a unos 2-3 micrómetros por segundo mientras sigue la emisión de Co, Mn, Zr y Fe, contrastada en probetas seleccionadas con seccionamiento en profundidad por ablación láser ICP-MS.

En todas las probetas de curado oxidativo, el metal catalizador quedó confinado al recubrimiento y la madera inmediatamente inferior. Las emisiones de cobalto y manganeso alcanzaron su máximo en la superficie, se mantuvieron durante los 30-70 micrómetros de espesor de película y descendieron más de un orden de magnitud en los 20-40 micrómetros siguientes al entrar en madera intacta; alcanzaron el fondo de 7 ppm del sustrato a unos 100 micrómetros en el peor caso (linaza cocida de baja viscosidad que penetra la porosidad) y a 60 micrómetros en el barniz más viscoso. Integrado, más del 90 % del metal paramagnético depositado estaba en los 100 micrómetros superiores y la mayoría en los 50 primeros. El circonio siguió al cobalto y manganeso en profundidad, pero, al ser efectivamente no paramagnético en esta coordinación, contribuyó al perfil sin contribuir a la susceptibilidad: control interno útil de que la señal magnética sigue a Co y Mn, no al metal total.

Es la peor distribución geométrica posible para un soporte de cable. El grado de neutralidad partía de que la madera en contacto con el conductor era diamagnética; el acabado invierte esa premisa cargando metal paramagnético en la piel exacta de 50-100 micrómetros que forma la interfaz, mientras deja tan limpio como siempre el núcleo profundo y electromagnéticamente irrelevante. Magnéticamente, un soporte acabado es una fina lámina paramagnética envuelta alrededor de una troza neutra y presentada al cable con el metal hacia fuera.

5. LA TENDENCIA DE SECANTES SIN COBALTO NO AYUDA

El octoato de cobalto está sometido a presión regulatoria. Las sales de cobalto del ácido 2-etilhexanoico cuentan con una clasificación armonizada como presuntos carcinógenos y tóxicos para la reproducción, y durante la última década la industria de



los recubrimientos ha invertido mucho en secantes sin cobalto. Los sustitutos se dividen en tres familias: complejos de manganeso -- a menudo con ligandos de bipyridina o aminometilo que elevan la actividad de Mn hasta niveles similares a los del cobalto --, complejos de hierro -- hierro con ligandos especializados donantes de nitrógeno, comercializados como secantes primarios de alto rendimiento que pueden sustituir directamente al anterior -- y sistemas basados en vanadio. Los tres se promocionan como más seguros y, para su objetivo previsto -- sustituir un catalizador tóxico por otro benigno manteniendo la misma velocidad de secado --, varios lo consiguen realmente.

Para nuestro propósito no consiguen nada. El manganeso, el hierro y el vanadio son todos paramagnéticos; el hierro y el manganeso son los dos elementos que el grado de neutralidad se define expresamente para excluir. Sustituir el octoato de cobalto por un secante de hierro o de manganeso no retira metal paramagnético de la película superficial: sustituye un metal paramagnético por otro y, en el caso del hierro, introduce el contaminante que recibe la mayor penalización de toda la escala de grados. Aplicamos a otro conjunto de probetas de teca un secante comercial de hierro y bipyridina con la carga recomendada por el fabricante y medimos la lámina superficial en $+3.1 \times 10^{-6}$, un resultado comparable al de la linaza cocida con cobalto y, puesto que el metal es hierro y no cobalto, posiblemente peor para un grado cuyo eje principal es el contenido de hierro. Un secante de neodecanoato de manganeso dio $+2.6 \times 10^{-6}$.

La lección es que la tendencia a prescindir del cobalto optimiza un objetivo toxicológico que es ortogonal al magnético. No existe ninguna química de secante de curado oxidativo, ni actual ni previsible, que endurezca un aceite secante sin un metal de transición con actividad redox, y todo metal de transición con actividad redox lo bastante barato y abundante para actuar como secante es paramagnético. La industria de los acabados no va a resolver este problema porque, desde su punto de vista, no hay ningún problema que resolver: un secante magnéticamente neutro sería una solución en busca de un mercado que, por ahora, está compuesto enteramente por nosotros.

6. DISCUSIÓN: LAS OPCIONES QUE QUEDAN

Si los acabados de curado oxidativo se excluyen por motivos magnéticos, quedan tres categorías de recubrimiento formalmente libres de metales: aceites de secado sin secante, películas al agua de secado físico y coalescentes, y lacas verdaderamente evaporativas. Nuestro aceite de tung sin secante -- tratamiento B -- y la dispersión acrílica -- tratamiento E -- confirmaron que estos materiales no añaden metal paramagnético y conservan el grado. Sin embargo, son malos acabados para este objeto concreto. Un aceite sin secante aplicado a un soporte que debe curar por completo antes de poder sostener un cable tarda semanas en endurecer y permanece de forma permanente lo bastante blando para retener metal superficial procedente del clip del cable y de la manipulación ordinaria: convierte el soporte en un colector pasivo de exactamente la contaminación que el grado excluye. Un acrílico al agua sella la madera, pero eleva su permitividad superficial y su tangente de pérdidas muy por encima de las de la teca desnuda, cambiando un problema magnético que el grado prohíbe por un problema dieléctrico que el estudio complementario también penaliza.

En otras palabras, cada acabado o bien añade metal paramagnético -- los aceites y barnices de curado oxidativo, es decir, toda la clase tradicional --, o bien degrada la superficie dieléctrica -- las películas al agua --, o bien no alcanza una dureza de curado suficiente para resistir la recontaminación durante el servicio -- los aceites sin secante --. Ninguno de ellos mejora la superficie clasificada, y cada uno constituye un paso realizado después de que la madera ya haya superado todas las pruebas que exige el grado. El acabado solo puede restar valor a un grado que la troza en bruto ya posee; no existe ningún recubrimiento capaz de sumárselo, porque la magnitud clasificada es la ausencia de algo y un recubrimiento es, por definición, una adición.

Esto transforma el soporte sin acabado: deja de ser un ahorro de costes o una austeridad estética y se convierte en la única opción compatible con la medición. La troza se selecciona, se explora, se testifica, se digiere, se ensaya y se certifica conforme a una cifra paramagnética en partes por millón; aplicar después con brocha un aceite catalizado con cobalto sobre su cara de trabajo equivale a gastar todo ese proceso y deshacerlo en el último paso, en la ubicación de mayor actividad electromagnética, a cambio de una película de apariencia.

7. CONCLUSIÓN

Acabar la madera la recontamina magnéticamente y lo hace en la superficie, porque la química que endurece un acabado tradicional es autooxidación catalizada por metal y el catalizador es un metal de transición paramagnético depositado en la película. Medimos el efecto directamente: sobre un único sustrato de teca 5N, cada acabado oxidativo -- linaza cocida con cobalto, barniz marino Co + Mn + Zr y aceite de cera dura con cobalto -- llevó la susceptibilidad volumétrica superficial desde una línea base diamagnética cercana a -6×10^{-6} hasta valores netos positivos de $+4.8 \times 10^{-6}$, reclasificando la superficie de 5N a menos de 4N, con más del 90 % del metal paramagnético confinado a los 100 micrómetros superiores en contacto directo con el cable. Aceites sin secante y películas al agua no añaden metal, pero fallan por otros motivos; la tendencia sin cobalto sustituye hierro, manganeso o vanadio y elimina una toxina sin eliminar una sola unidad de contaminación paramagnética.

La conclusión es estrecha y firme. El único acabado que conserva el grado de neutralidad de una madera es ningún acabado. La superficie sin acabado se oxida y encanece, pero la pátina es oxidación elemental del esqueleto de carbono y no añade metal: es un cambio cosmético y un no suceso magnético. Los Bloques de Elevación Equatoriales suministran y seguirán suministrándose



sin acabado, no porque se omitiera un paso para ahorrar, sino porque aplicarlo gastaría todo el grado para comprar brillo.

REFERENCIAS

- [1] Soucek, M. D., Khattab, T., Wu, J. (2012). Revisión de la autooxidación y los secantes. *Progress in Organic Coatings*, 73(4), 435-454.
- [2] Erich, S. J. F., Laven, J., Pel, L., Huinink, H. P., Kopinga, K. (2006). Distribución de jabones metálicos y secado catalítico de recubrimientos alquídicos estudiados mediante imagen RMN. *Progress in Organic Coatings*, 55(2), 105-113.
- [3] Micciche, F., van Haveren, J., Oostveen, E., Ming, W., van der Linde, R. (2006). Recubrimientos de aceite y sustitución de secantes de cobalto por complejos de manganeso y hierro. *Applied Catalysis A: General*, 297(2), 174-181.
- [4] van Gorkum, R., Bouwman, E. (2005). Secado oxidativo de pintura alquídica catalizado por complejos metálicos. *Coordination Chemistry Reviews*, 249(17-18), 1709-1728.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Clasificación de la neutralidad magnética de madera estructural: una clasificación de pureza por grados N para materiales de soporte de audio. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(2), 44-71.
- [6] Solder, L., Bosque, A. (2026). Perfilado en profundidad por descarga luminiscente de contaminación paramagnética referida a superficie en probetas de frondosa acabadas. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(3), 88-104.