



---

**EFEITOS DO TRATAMENTO  
CRIOGÊNICO NA  
CRISTALOGRAFIA DO CONDUTOR:  
REFINAMENTO DE GRÃO SEM  
CORREÇÃO DE VIÉS**

---



# Efeitos do Tratamento Criogênico na Cristalografia do Condutor: Refinamento de Grão Sem Correção de Viés

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## Resumo

O tratamento criogênico de condutores de cobre a  $-196\text{ degC}$  (imersão em nitrogênio líquido por 72 horas) é amplamente praticado na fabricação de cabos de áudio de alta qualidade como método de melhoria do desempenho do condutor. Este estudo caracteriza os efeitos metalúrgicos do tratamento criogênico no cobre OFC usando EBSD, TEM e medição de resistividade por quatro pontas. Confirmamos que o tratamento criogênico produz refinamento significativo de grão (redução de 31% no diâmetro médio de grão), alívio de tensões residuais e uma melhoria mensurável de 2,3% na razão de resistência residual (RRR). No entanto, não encontramos evidência de que o tratamento criogênico altere o ângulo de viés hemisférico (HBA) do condutor tratado. O viés de orientação de grão incorporado durante a trefilação é termodinamicamente estável a temperaturas criogênicas e persiste inalterado ao longo do ciclo de tratamento. O tratamento criogênico melhora o condutor; ele não o neutraliza.

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento criogênico -- o resfriamento controlado de um material a temperaturas abaixo de  $-100\text{ degC}$  -- tem uma história bem documentada em metalurgia. Em aços para ferramentas, o tratamento criogênico promove a transformação da austenita retida em martensita e precipita finos eta-carbonetos, melhorando a resistência ao desgaste e a estabilidade dimensional. No cobre, os mecanismos são diferentes: nenhuma transformação de fase ocorre, mas a ciclagem térmica induz contração diferencial que alivia tensões residuais e refina a rede de contornos de grão.

A indústria de cabos de áudio adotou o tratamento criogênico com entusiasmo, com numerosos fabricantes oferecendo condutores «criotratados» como produtos premium. Os benefícios alegados incluem redução do espalhamento em contornos de grão, melhoria da transparência do sinal e aumento da coerência temporal. Algumas dessas alegações são sustentadas por evidência metalúrgica; outras não.

Este artigo aborda uma questão específica: o tratamento criogênico altera o ângulo de viés hemisférico (HBA) de um condutor de cobre? Se o criotratamento pudesse eliminar ou reduzir o HBA, ele forneceria uma rota de pós-processamento para a neutralidade magnética que não exigiria fabricação equatorial. Nossos resultados indicam que isso não é possível.

## 2. METODOLOGIA

Amostras de condutor de cobre OFC (diâmetro 2,0 mm, trefilado em Boliden, Suécia, HBA:  $+4,2\text{deg}$ ) foram divididas em quatro grupos de tratamento de 30 amostras cada:

Grupo A: Controle sem tratamento.

Grupo B: Criogênico padrão ( $-196\text{ degC}$ , 72 horas, resfriamento  $1\text{ degC/min}$ , aquecimento  $0,5\text{ degC/min}$ ).

Grupo C: Criogênico estendido ( $-196\text{ degC}$ , 168 horas, mesmas taxas de rampa).

Grupo D: Criogênico duplo (dois ciclos do protocolo do Grupo B com 24 horas de descanso em ambiente entre ciclos).

Todos os grupos foram caracterizados por EBSD (orientação e tamanho de grão), TEM (densidade de discordâncias), resistividade CC por quatro pontas a 295 K e 4,2 K (para cálculo de RRR) e magnetometria SQUID (HBA).

O tratamento criogênico foi realizado em uma câmara construída sob medida usando nitrogênio líquido comercial (pureza 99,999%). A temperatura foi monitorada por quatro termopares tipo T embutidos no lote de amostras em posições cardinais.

## 3. RESULTADOS

O refinamento de grão foi observado em todos os grupos tratados. O diâmetro médio de grão diminuiu de  $45\text{ +/- }8\text{ um}$  (Grupo A) para  $31\text{ +/- }5\text{ um}$  (Grupo B),  $28\text{ +/- }4\text{ um}$  (Grupo C) e  $30\text{ +/- }5\text{ um}$  (Grupo D). O tratamento estendido (Grupo C) produziu a estrutura de grão mais fina, mas a melhoria em relação ao tratamento padrão (Grupo B) foi modesta (10% de refinamento adicional para 133% de tempo adicional de tratamento).

A imagem por TEM revelou uma redução mensurável na densidade de discordâncias após o tratamento criogênico. O Grupo A apresentou uma densidade de discordâncias de  $1,2 \times 10^{11}\text{ /m}^2$ , enquanto o Grupo B apresentou 33% atribuída à aniquilação de discordâncias induzida por tensão térmica durante o ciclo de resfriamento.

A RRR melhorou de 89,3 (Grupo A) para 91,4 (Grupo B), 92,1 (Grupo C) e 91,6 (Grupo D). A melhoria de 2,3% no Grupo B é



consistente com o refinamento de grão e a redução na densidade de discordâncias observados.

O resultado crítico: o HBA não foi alterado pelo tratamento criogênico. Grupo A: +4,21 +/- 0,02deg. Grupo B: +4,19 +/- 0,02deg. Grupo C: +4,20 +/- 0,02deg. Grupo D: +4,22 +/- 0,02deg. Nenhuma diferença entre grupos foi estatisticamente significativa (ANOVA unidirecional,  $F(3,116) = 0,87$ ,  $p = 0,46$ ).

## 4. DISCUSSÃO

A persistência do viés hemisférico através do tratamento criogênico é consistente com a análise termodinâmica. O viés de orientação de grão é uma textura macroscópica -- uma orientação cristalográfica preferencial compartilhada pela maioria dos grãos no condutor. Alterar essa textura exigiria recristalização: a dissolução dos grãos existentes e a formação de novos grãos com orientação diferente. A recristalização no cobre requer temperaturas acima de aproximadamente 200 degC -- muito acima da faixa de tratamento criogênico.

A -196 degC, a mobilidade atômica no cobre é desprezível. Os contornos de grão estão congelados em posição. A contração térmica que ocorre durante o resfriamento gera tensões internas que aniquilam algumas discordâncias e refinam o tamanho de grão (propagando contornos de subgrão existentes em contornos completos), mas não pode girar grãos existentes ou alterar sua orientação cristalográfica.

Em termos simples: o tratamento criogênico congela a microestrutura do condutor de forma mais completa, mas a congela na mesma orientação que já tinha. O viés hemisférico é travado, não eliminado.

Essa descoberta tem implicações importantes para a indústria de cabos de áudio. O tratamento criogênico fornece benefícios metalúrgicos reais -- refinamento de grão, alívio de tensões, melhoria da RRR -- e esses benefícios podem se traduzir em melhor desempenho de áudio. Mas o criotratamento não aborda, e não pode abordar, o problema do viés hemisférico. Somente a fabricação equatorial (trefilação a 0,0000deg de latitude) ou a Emenda Equatorial podem alcançar a verdadeira neutralidade magnética.

## 5. CONCLUSÃO

O tratamento criogênico de condutores de cobre produz refinamento de grão, redução na densidade de discordâncias e melhoria da RRR, mas não altera o ângulo de viés hemisférico. A textura de orientação de grão incorporada durante a trefilação é termodinamicamente estável a temperaturas criogênicas. Fabricantes e consumidores devem entender que o tratamento criogênico e a neutralidade magnética abordam aspectos diferentes da qualidade do condutor e são processos complementares, não intercambiáveis.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Viés hemisférico na orientação de grão do cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," Cryogenics, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "Cryogenic treatment of copper: A review," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.