

## EFEITO MEISSNER PARAMAGNÉTICO DE ALTO CAMPO EM MONOCRISTAIS SUPERCONDUTORES DE $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

**FALCK, Augusto Ludtke<sup>1</sup>** - [alfalck@hotmail.com](mailto:alfalck@hotmail.com)

**DIAS, Fábio Teixeira<sup>1</sup>** - [diasft@gmail.com](mailto:diasft@gmail.com)

**PUREUR, Paulo<sup>2</sup>** - [ppureur@if.ufrgs.br](mailto:ppureur@if.ufrgs.br)

**SCHAF, Jacob<sup>2</sup>** - [schaf@if.ufrgs.br](mailto:schaf@if.ufrgs.br)

1. Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil

2. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

**VIEIRA, Valdemar das Neves<sup>1</sup>** - [vdnvieira@gmail.com](mailto:vdnvieira@gmail.com)

1. Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil

### 1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho relatamos resultados experimentais parciais de magnetização DC em função da temperatura,  $M(T)$  são obtidos a partir do procedimento “field-cooled” quando campos magnéticos,  $H$  variando entre  $1 \cdot 10^{-3}$  kOe e 50 kOe são aplicados paralelamente ao eixo cristalográfico  $c$  de uma série de monocristais de  $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $x = 0, 0.0025, 0.01$  e  $0.1$ ).

Os dados de  $M(T)$  exibem, a partir de determinado valor de  $H$  aplicado, um comportamento paramagnético não usual o qual mostrar-se intrigantemente dependente de  $T$  e de  $H$ . [1,2] Este comportamento recebe na literatura a denominação de efeito Meissner paramagnético de alto campo (HPME) e encontra-se diretamente relacionado a efeitos provenientes da dinâmica dos vórtices em supercondutores. A compreensão da dinâmica de vórtices e dos fenômenos a ela associados são fatores essenciais para o avanço da pesquisa básica e aplicada de supercondutores. Particularmente, as hipóteses teóricas até agora apresentadas não conseguem interpretar o HPME na sua totalidade, mantendo este tema em aberto. [3,4]

Norteados por estas necessidades, passamos a desenvolver um trabalho com o objetivo de pesquisar originalmente a influência da dopagem com Ca sobre o HPME em monocristais de  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ .

### 2 METODOLOGIA (MATERIAL E MÉTODOS)

Os monocristais foram crescidos segundo a técnica de auto-fluxo. [5] Esta técnica caracteriza-se pelo crescimento de monocristais em temperaturas abaixo da fase líquida.

Inicialmente, uma mistura é preparada segundo uma estequiometria específica empregada para a obtenção dos monocristais supercondutores desejados, no caso  $(YCa)_1Ba_4Cu_{10}$ . A mistura é acondicionada no interior de um cadinho de zircônia em forma de uma gamela retangular e colocada num forno tipo mufla.

O próximo passo é empregar o tratamento térmico recomendado [5] com resfriamento lento a partir dos  $1000^\circ\text{C}$  onde se dá a nucleação e o crescimento dos monocristais.

A última etapa do processo é o de submeter os monocristais selecionados a um tratamento de oxigenação extra a 450°C por dez dias. Essa etapa é importante para obtenção de monocristais supercondutores de boa qualidade.

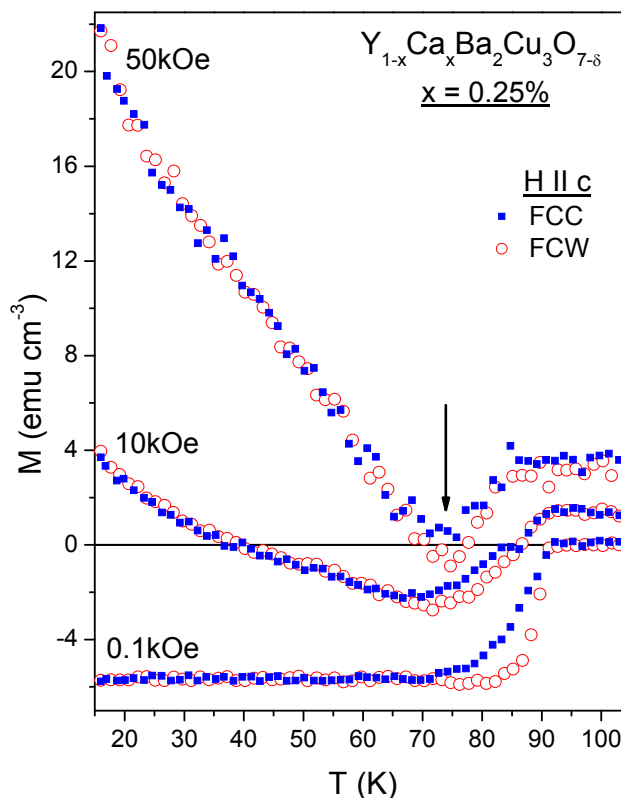
As medidas de magnetização DC em função da temperatura e campo magnético,  $M(T,H)$  foram efetuadas com o uso de um magnetômetro de SQUID o qual pertence ao Laboratório de Magnetismo e Supercondutividade do Instituto de Física da UFRGS.

Neste equipamento, a magnetização DC pode ser medida com uma precisão de até  $5 \cdot 10^{-7}$  e.m.u. e em campos magnéticos  $1 \cdot 10^{-2}$  Oe até 50 kOe. O sistema opera em uma faixa de temperatura compreendida entre 1.9 e 400K, onde a taxa de variação de temperatura pode ocorrer desde 0.01 até 10 K/min e pode ser lida com uma precisão de 0.01 K.

Durante este trabalho, a magnetização DC foi registrada enquanto a temperatura variou de 103K a 16K [ $M_{FCC}(T)$ ] e subsequentemente de 16K a 103K [ $M_{FCW}(T)$ ] em campos magnéticos aplicados variando entre 1 Oe até 50 kOe aplicados ao longo do eixo c das amostras.[1,5]

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A **Figura 1** mostra o comportamento de  $M(T)$  para o monocristal  $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $x = 0.25\%$ ) quando  $H = 0.1, 10$  e  $50$  kOe aplicado paralelamente ao eixo cristalográfico c. Os símbolos em azul representam  $M_{FCC}(T)$  e os símbolos em vermelho representam  $M_{FCW}(T)$ .



**Figura 1** – Comportamento de  $M_{FCC}(T)$  e  $M_{FCW}(T)$  para o monocristal de  $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $x = 0.25\%$ ) para  $H || c$ .

Através da Figura 1 podemos observar que para campos da ordem de 0.1 kOe o comportamento de  $M(T)$  exibe o efeito Meissner tradicional para o estado misto de um supercondutor do tipo II.

Neste estado, a resposta magnética é diamagnética tanto no procedimento FCC quanto no FCW, ou seja, nesta configuração o fluxo magnético, arranjado na forma de vórtices, existente no interior do supercondutor é parcialmente expelido deste ao passo que uma fração fica retida no material devido a existência de centros de aprisionamento de vórtices, fato que justifica o comportamento constante de  $M(T)$  observado a temperaturas inferiores a 70K independentemente do processo de medida adotado.

Nota-se também, nesta figura, um comportamento muito diferente de  $M(T)$  quando campos maiores do que 10kOe são aplicados. Tomando-se o comportamento de  $M_{FCC}(T)$ , nota-se que depois de atingido um “dip”, assinalado por uma seta na Figura 1,  $M_{FCC}(T)$  passa a diminuir a intensidade do sinal diamagnético assumindo uma clara tendência de inversão para um comportamento paramagnético consolidado para  $T < 40K$ . Por outro lado, quando  $H = 50kOe$  o comportamento de  $M_{FCC}(T)$  é totalmente paramagnético sem uma aparente tendência à saturação. De maneira análoga, podemos interpretar o comportamento de  $M_{FCW}(T)$  apenas levando em consideração a inversão do ciclo térmico no processo FCW.

A observação de uma histerese térmica no comportamento de  $M(T)$  durante a execução dos processos FCC e FCW está ligada a diferente ativação por parte dos mecanismos de aprisionamento de vórtices quando a amostra é resfriada ou aquecida na presença do mesmo campo magnético aplicado.

A manifestação paramagnética do comportamento de  $M(T)$  a partir da aplicação de campos da ordem 1kOe é a assinatura típica do HPME em supercondutores. Constata-se a partir da aplicação de  $H$  que os dados de  $M(T)$  mostram a clara tendência de que a intensidade do HPME é diretamente proporcional a intensidade de  $H$  e que ele manifesta-se independentemente da ciclagem térmica empregada.

Resultados parciais de  $M(T)$  e de relaxação magnética provenientes dos demais monocristais mostram preliminarmente que a magnitude do HPME é aumentada quando substituímos parcialmente o Y por Ca no  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . [1]

O comportamento paramagnético de  $M(T)$ , ao contrário do que prevê o efeito Meissner tradicional, pode estar associado a um possível aumento do fluxo magnético no interior do supercondutor. Aumento esse provavelmente proporcionado por um resfriamento inomogêneo da amostra quando da execução dos processos FCC e FCW. Este cenário está em acordo com o previsto pelos modelos de compressão de fluxo magnético [1 - 3] e estado de vórtice gigante [4], entretanto, ambos falham na tentativa de explicar a relação existente entre a magnitude do HPME e  $H$ .

Por outro lado, acreditamos que o aumento da intensidade do HPME nos monocristais dopados esteja relacionado a possível adição de centros de aprisionamento de vórtices adicionais a estrutura do  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  em virtude da substituição parcial do Y por Ca.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as medidas de magnetização FC no monocristal  $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $x = 0.25\%$ ) mostraram que o HPME adquire características que dependem da escala de campos magnéticos empregada na realização das medidas. Neste caso temos um efeito que se reforça à medida que o campo magnético é aumentado, sem uma aparente tendência à saturação até o valor máximo de campo aplicado em nosso trabalho ( $H = 50$  kOe).

Resultados preliminares obtidos nos demais monocristais apontam a existência de centros de aprisionamento de vórtices adicionais como prováveis responsáveis pelo aumento da intensidade do HPEM no  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . [1]

Uma possível interpretação para nossos resultados é realizada segundo os cenários de compressão de fluxo magnético [1 - 3] e estado de vórtice gigante [4], embora ambos modelos apresentem-se não conclusivos para a totalidade dos nossos resultados experimentais.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] Dias, F.T.; Vieira, V.N.; Almeida, M.L.; Falck, A.L.; Pureur, P. Paramagnetic Meissner effect at high fields in  $YCaBaCuO$  single crystal and melt-textured  $YBaCuO$ . **Physica C: Superconductivity**, artigo on-line, doi:10.1016/j.physc.2010.01.018, 2010.
- [2] Kusmartsev, F.V. Orbital Glass. **Physical Letters A**, Amsterdam, v. 169, p. 108-114, Sept. 1992.
- [3] KOSHELEV, A. E.; LARKIN, A. I. Paramagnetic moment in field-cooled superconducting plates: paramagnetic Meissner effect. **Physical Review B**, Woodbury, v. 52, n. 18, p. 13559-13562, Nov. 1995.
- [4] MOSHCHALKOV, V. V.; QIU, X. G.; BRUYNDONCX, V.. Paramagnetic Meissner effect from the self-consistent solution of the Ginzburg-Landau equations. **Physical Review B**, Woodbury, v. 55, n. 17, p. 11793-11801, May 1997.
- [5] VIEIRA, V. N.; RIEGEL, I. C.; SCHAF, J. Granular superconductivity in a Ca-doped  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  single crystal: Role of divalent impurities and the effect of applied fields on the grain coupling. **Physical Review B**, Woodbury, v. 76, p. 024518-1, July 2007.