

## IRREVERSIBILIDADE MAGNÉTICA EM FILMES FINOS DE $YBaCuO$

**ALMEIDA, Moisés Leonardi; DIAS, Fábio Teixeira; DAS NEVES, Valdemar Vieira.**

*Curso de Pós-Graduação em Física – IFM/UFPeI  
Campus Universitário – Caixa Postal 354 – CEP 96010-900. almeida.moises@gmail.com*

**SCHAF, Jacob.**

*Programa de Pós-Graduação em Física – IF/UFRGS  
Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre-RS 91501-970, Brasil*

**OBRADORS, Xavier.**

*Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Campus Universitat Autònoma de Barcelona,  
Bellaterra 08193, Espanha*

### 1. INTRODUÇÃO

O fenômeno da supercondutividade foi observado pela primeira vez em 1911 por Heike Kamerling Onnes. Ao analisar a variação da resistividade elétrica de uma amostra de mercúrio em função da temperatura, Onnes observou o abrupto desaparecimento da resistência próximo a uma temperatura de 4,2K. Então, concluiu que o mercúrio passa de um estado resistivo normal a um novo estado, denominado *estado supercondutor*, no qual a resistividade é estreitamente nula. De fato, a variação súbita da resistência elétrica numa temperatura bem definida, denominada temperatura crítica  $T_c$ , indica a ocorrência de um fenômeno de transição de fase, no qual as propriedades eletrônicas do material são modificadas.

Estudando o comportamento de amostras de estanho em função da temperatura e na presença de campo magnético, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram, em 1933, um dos efeitos mais importantes do estado supercondutor. Aplicando-se um campo magnético a um sistema supercondutor quando este se encontra no estado normal ( $T > T_c$ ) e resfriando-o na presença de um campo magnético, observa-se uma abrupta expulsão do fluxo magnético do interior do material quando este transita ao estado supercondutor em  $T = T_c$ . Este é o fenômeno conhecido como *efeito Meissner*.

A resposta dos supercondutores face à presença de um campo magnético externo leva-nos a classificar os sistemas supercondutores em dois tipos.

Os supercondutores do tipo I apresentam apenas os estados Meissner e normal. Assim, se o campo magnético externo aplicado for inferior a um determinado valor crítico não ocorre penetração de fluxo magnético no material. Já os supercondutores do tipo II apresentam dois campos críticos. O estado Meissner, com exclusão total do fluxo magnético, persiste até um campo crítico inferior  $B_{c1}$ . Acima deste campo, o fluxo magnético penetra parcialmente na amostra, embora a supercondutividade se mantenha até o campo crítico superior  $B_{c2}$ . A região entre os valores dos dois campos críticos, na qual o efeito Meissner é parcial, é denominada de estado misto.

O campo magnético penetra nos supercondutores sob forma de finos tubos filamentosos, chamados *vórtices*, sendo que cada vórtice transporta um quantum de fluxo magnético.

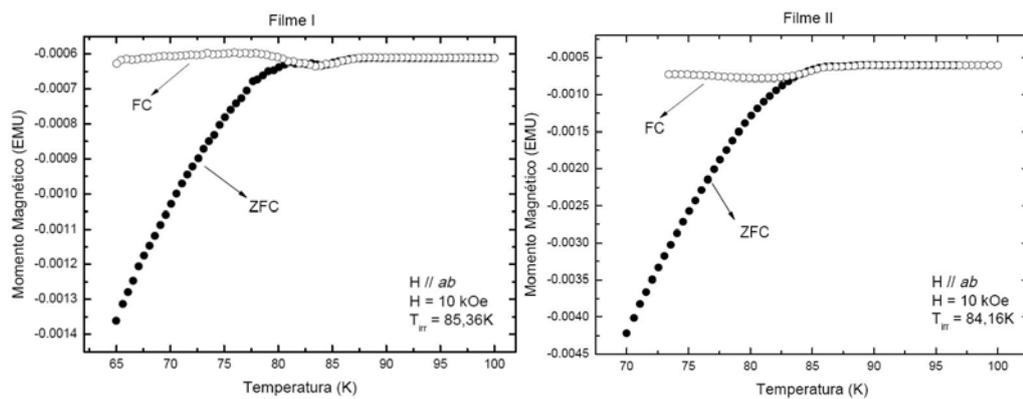
Um fator limitante ao uso prático dos supercondutores é a baixa temperatura em que estes materiais transitam para o estado em que exibem a supercondutividade. Entretanto, em 1987 uma equipe liderada por C. W. Chu encontrou uma liga cerâmica que apresentava temperatura crítica de aproximadamente 92K, chamado de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Os sistemas supercondutores apresentam propriedades irreversíveis na magnetização, que originam a conhecida linha de irreversibilidade magnética. Este caráter irreversível pode ser evidenciado segundo as prescrições *Zero Field Cooling* (ZFC) e *Field Cooling* (FC). Na realização da experiência ZFC parte-se de uma temperatura acima da temperatura crítica e resfria-se a amostra em campo magnético nulo até baixas temperaturas. Então, aplica-se o campo magnético e mede-se a magnetização em função da temperatura. Por outro lado, o procedimento FC é feito partindo-se de uma temperatura superior a temperatura crítica e na presença de um campo magnético. A amostra é resfriada até baixas temperaturas e mede-se a magnetização em função da temperatura.

Através da realização destas experiências é possível observar fortes efeitos de irreversibilidade magnética. Abaixo de uma determinada temperatura, denominada *temperatura de irreversibilidade* ( $T_{irr}$ ), as curvas apresentam comportamentos distintos.

A Figura 1 apresenta medidas de magnetização realizadas para os dois filmes de YBaCuO analisados neste trabalho quando submetidos a um campo magnético de 10kOe paralelo ao plano cristalográfico *ab*.



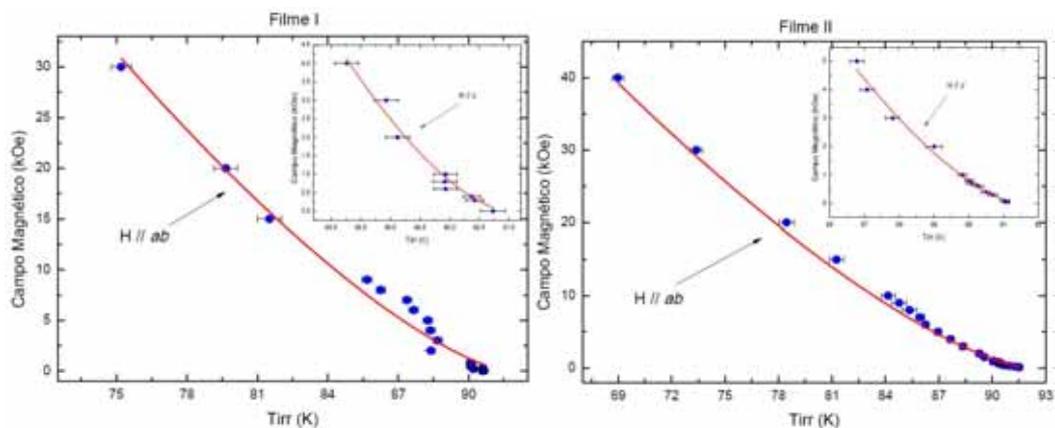
**Figura1:** Medidas de magnetização segundo as práticas ZFC e FC.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a Figura 1, por exemplo, podemos concluir que a  $T_{irr}$  separa uma fase magneticamente irreversível, situada numa região de baixa temperatura, de uma fase de alta temperatura na qual o comportamento magnético do sistema é reversível.

A irreversibilidade ocorre devido ao aprisionamento de vórtices (flux pinning) no interior da amostra. Abaixo de  $T_{irr}$  os vórtices têm sua mobilidade fortemente diminuída pelos centros de aprisionamentos (pinning). Este estado é também chamado de *vidro de vórtices*. Acima de  $T_{irr}$ , os vórtices têm sua mobilidade garantida, o que nos leva ao estado denominado *líquido de vórtices*.

O gráfico  $T_{irr}$  versus campo magnético nos dá a linha de irreversibilidade, conforme visualizada na Figura 2, com o campo magnético aplicado paralelamente ao plano *ab* dos filmes finos de YBaCuO. A inserção nos gráficos representa a linha de irreversibilidade para a configuração em que o campo magnético é aplicado ao longo do eixo cristalográfico *c* dos filmes. Neste gráfico foi feito o ajuste matemático preliminar a uma função já conhecida teoricamente, a qual descreve o comportamento da irreversibilidade magnética.



**Figura 2:** Linha de irreversibilidade magnética para os dois filmes finos e o ajuste matemático preliminar.

A função matemática que descreve a linha de irreversibilidade magnética tem a forma dada pela seguinte equação:

$$H = P_1 \left[ 1 - \frac{T_{irr}}{P_2} \right]^{P_3}$$

Onde:  $H$  é o campo magnético;  $P_1$  é uma constante com dimensão de campo magnético;  $P_3$  é uma constante adimensional;  $T_{irr}$  é a temperatura de irreversibilidade;  $P_2$  é a temperatura de irreversibilidade extrapolada para o caso de campo magnético nulo, ou seja, o próprio valor da temperatura crítica.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com a literatura, a linha de irreversibilidade pode ser originada de um fenômeno de ativação térmica, chamado “Flux Creep”, no qual as forças de aprisionamento de campo no interior da amostra não conseguem manter o sistema de vórtices aprisionado acima de uma dada temperatura. Os resultados obtidos mostram que a linha de irreversibilidade para o filme II se ajusta ao modelo Giant Flux Creep (GFC), proposto por Malozemoff-Yeshurun. Neste caso,

a lei de potências que rege a linha de irreversibilidade é a mesma para todos os intervalos de campo magnético aplicados, sendo o expoente  $P_3$  igual a  $3/2$ . O modelo GFC é aplicado para sistemas fracamente granulares, ou seja, amostras de boa qualidade. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) ratificarão o ajuste segundo o modelo GFC. Entretanto, para o filme I, na região de baixo e alto campo, os dados ajustam-se ao expoente  $P_3=3/2$ . Já na região intermediária de campo aplicado, aparentemente os dados se ajustam segundo o comportamento Gabay-Toulouse, o qual prevê  $P_3=1/2$ . A variação do expoente  $P_3$  para a mesma linha de irreversibilidade é esperada em sistemas granulares. A granularidade do filme I deverá ser evidenciada com imagens de MEV. Os resultados obtidos não são conclusivos e ainda será feita uma análise destes resultados e uma comparação com outros trabalhos sobre o assunto e com a literatura existente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIAS, F. T. et al. Correlation between the magnetic irreversibility limit and the zero resistance point in different granular YBaCuO superconductors. **Physical Review B**, 2008. v. 77. p. 134503-1.

DIAS, F. T. et al. Magnetic irreversibility and zero resistance in melt-textured YBaCuO. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2008. v. 320. p. 481-483.

CHU, C. et al. Superconductivity at 93K in a New Mixed-Phase YBaCuO Compound System at Ambient Pressure. **Physical Review Letters**, 1987. v. 58, n. 9. p. 908-910.

YESHURUN, Y., MALOZEMOFF, A. Gigant Flux Creep and Irreversibility in an YBaCuO Crystal: An Alternative to the Superconducting-Glass Model. **Physical Review Letters**, 1988. v. 60, n. 21. p. 2202-2205.

ALMEIDA, J., THOULESS, D. Stability of the Sherrington-Kirkpatrick Solution of a Spin Glass Model. **Journal Physics A**, 1978. v.11, n.5. p. 983-990.

GABAY, M.; TOULOUSE, G. Coexistence of spin-glass and ferromagnetic orderings. **Physical Review Letters**, 1981. v. 47, n. 3, p. 201-204.

ROMA, N. et al. Acid anhydrides: a simple route to highly pure organometallic solutions for superconducting films. **Superconductor Science and Technology**, 2006, v. 19, n.6, p. 521-527.

CYROT, M., PAVUNA, D. Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials, **World Scientific Co.**, Singapore, 1992.