

## O EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO Y POR Pr SOBRE A DENSIDADE DE ENERGIA CINÉTICA DE CONDENSAÇÃO DOS PARES DE COOPER NO COMPOSTO SUPERCONDUTOR $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

RENNAN PEREIRA DE SOUZA<sup>1</sup>; ALCIONE ROBERTO JURELO <sup>2</sup>; PAULO PUREUR<sup>3</sup>; VALDEMAR DAS NEVES VIEIRA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS - UFPEL – rennan.souza@ufpel.edu.br

<sup>2</sup>UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA – UEPG

<sup>3</sup>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

<sup>4</sup>UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS - UFPEL – vdnvieira@gmail.com

### 1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho, serão apresentados resultados acerca da densidade de energia cinética de condensação de superpartículas,  $E_k$ , no composto monocristalino supercondutor  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  com substituição nominal de 5% do ítrio (Y) por praseodímio (Pr). Assim, o supercondutor  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  teve o comportamento de  $E_k$  determinado a partir da realização de medidas de magnetização DC, em função da temperatura com emprego de campo magnético ( $\mathbf{B} \leq 5\text{T}$ ), cujos resultados obtidos foram submetidos a aplicação do Teorema do Virial da Supercondutividade (TVS), descrito por DORIA et al. (1989).

Seguindo o TVS, teremos  $E_k(T, \mathbf{B})$ , onde  $T$  é temperatura e  $\mathbf{B}$  é o campo indução magnética, onde  $\mathbf{B} \approx \mu_0 \mathbf{H}$ , com  $\mathbf{H}$  sendo campo magnético aplicado. Ainda, de acordo com o formalismo previsto no TVS,  $E_k(T, \mathbf{B})$  é definido como:

$$E_k(T, \mathbf{B}) = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} \quad (1)$$

onde  $\mathbf{M}$  é o vetor magnetização reversível, proveniente da resposta da amostra frente a aplicação do campo indução magnética  $\mathbf{B}$ .

Na literatura é observado que o Y quando substituído por elementos “Rare-Earth”, RE (Terra-Rara), na estrutura do  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  não altera significativamente o valor da temperatura crítica ( $T_c$ ) de transição do estado normal para o supercondutor, XU et al. (2008). Entretanto quando se trata do Pr, terra-rara de mesma valência que o Y(3+), há uma considerável redução de  $T_c$ , YU et al. (1999).

O efeito nocivo sobre  $T_c$  devido a substituição parcial do Y por Pr no composto  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$  ainda não foi pesquisado em termos do comportamento de  $E_k(T, \mathbf{B})$ , o que nos propomos a realizar nesse trabalho. O estudo do comportamento de  $E_k(T, \mathbf{B})$  poderá fornecer informações relevantes sobre como essa substituição parcial de até 5% do Y por Pr afeta o mecanismo supercondutor do  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Além disso, faremos equiparação do resultado obtido nesse trabalho com outros, citados na literatura, para monocristais de  $Y_{0,95}Ca_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ , SOUZA, R. P. (2023) e  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , SOUZA, R. P. (2023).

### 2. METODOLOGIA

Os monocristais de  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-6}$  empregados neste trabalho foram crescidos através do emprego da técnica de auto-fluxo no Departamento de Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

As medidas de magnetização DC foram realizadas no laboratório de supercondutividade e magnetismo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LSM) através do uso de um magnetômetro SQUID, onde a magnetização ( $M$ ) foi medida segundo os procedimentos “zero field cooled” (ZFC) para  $M_{\text{zfc}}(T)$  e “field cooled cooling” (FCC) para  $M_{\text{fcc}}(T)$  quando campos magnéticos variando entre  $0,001 \text{ T} \leq B \leq 5 \text{ T}$  foram aplicados ao longo do eixo cristalográfico  $c$  do monocristal, o qual coincide com a espessura desse que apresenta formato geométrico de uma placa medindo aproximadamente  $1 \text{ mm}^2$  de área e  $0,1 \text{ mm}$  de espessura.

O procedimento ZFC é realizado da seguinte forma: resfria-se a amostra, de  $T > T_c$  na ausência de campo magnético aplicado até  $T < T_c$ . Na sequência aplica-se um valor de  $B$ , previamente selecionado, e aumenta-se a temperatura até que  $T > T_c$  seja atingido, sendo  $M_{\text{zfc}}(T)$  registrada durante esse aumento de  $T$ . O procedimento FCC é realizado sem realizar nenhum ajuste na magnitude de  $B$ , a amostra é resfriada partindo de  $T > T_c$  até que  $T < T_c$  seja atingido, durante esse resfriamento  $M_{\text{fcc}}(T)$  é registrada. A análise dos comportamento de  $M_{\text{zfc}}(T)$  e  $M_{\text{fcc}}(T)$  ocorre através do emprego de um “software” gráfico compatível para esta análise.

B)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como ressaltado anteriormente, o emprego do TVS foi aplicado considerando o comportamento reversível de  $M_{\text{zfc}}(T)$  ou  $M_{\text{fcc}}(T)$  o qual encontrasse localizado no intervalo compreendido entre  $T_{\text{irr}}(B) < T < T_c(B)$ , ou seja, entre as temperaturas de irreversibilidade magnética,  $T_{\text{irr}}(B)$ , e de transição do estado normal para o supercondutor,  $T_c(B)$ , as quais são obtidas de acordo com os procedimentos indicados na Figura 1. Na Figura 1A) é indicado o critério para determinação de  $T_c$  para a amostra  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-6}$  quando  $B \sim 0$  ( $B = 0,001 \text{ T}$ ) é aplicado. Na Figura 1B) é destacado o critério empregado para a obtenção de  $T_{\text{irr}}(B)$ , a qual é obtida através da subtração entre  $M_{\text{fcc}}$  e  $M_{\text{zfc}}$ . No “inset” da mesma, são destacados os comportamentos das  $M_{\text{zfc}}(B = 1 \text{ T})$  e  $M_{\text{fcc}}(B = 1 \text{ T})$ .

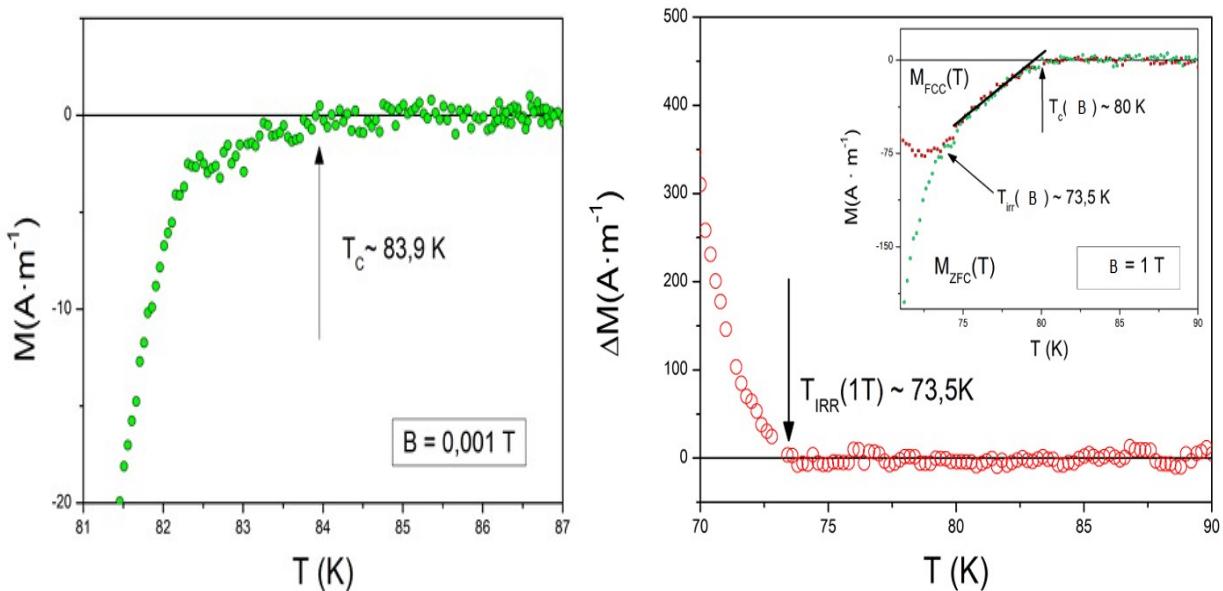


Figura 1 – A) A determinação de  $T_c$  da amostra  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  quando  $\mathbf{B} = 0,001 \text{ T}$  foi empregado. A seta indica aproximadamente o valor de  $T_c$ . O comportamento de  $\mathbf{M}_{\text{zfc}}(T)$  para quando a aplicação do campo  $\mathbf{B} = 0,001 \text{ T}$  é aplicado e o valor de  $T_c(\sim 0)$  é obtido. B) O comportamento da diferença  $\Delta\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{fcc}} - \mathbf{M}_{\text{zfc}}$  quando  $\mathbf{B} = 1 \text{ T}$  foi aplicado,  $T_{\text{irr}}(\mathbf{B} = 1 \text{ T})$  é identificado pela seta. O “inset” da figura mostra as magnetizações  $\mathbf{M}_{\text{zfc}}$  e  $\mathbf{M}_{\text{fcc}}$  empregados no cálculo de  $\Delta\mathbf{M}$ .

O valor de  $T_c \sim 83,9 \text{ K}$  obtido para a amostra  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  está de acordo com valores observados na literatura HILSCHER, et al. (1994), o que significa que a substituição parcial de até 5% do Y por Pr foi bem-sucedida.

Na Figura 1B), é destacado o método empregado para a obtenção de  $T_{\text{irr}}$ . O emprego do TVS se dará quando os comportamentos de  $\mathbf{M}_{\text{zfc}}(T)$  e  $\mathbf{M}_{\text{fcc}}(T)$  forem reversíveis, ou seja, quando  $\mathbf{M}_{\text{zfc}}(T)$  e  $\mathbf{M}_{\text{fcc}}(T)$  forem praticamente coincidentes, veja no inseto da Figura 1B VIEIRA, VALDEMAR (2004).

A Figura 2A) destaca os comportamentos de  $E_k(T, \mathbf{B})$  da amostra  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  quando  $0,1 \text{ T} \leq \mathbf{B} \leq 3 \text{ T}$  foram aplicados. Os símbolos no formato quadrado preto representam os valores de  $T_{\text{irr}}(\mathbf{B})$  ao passo que  $T_c(\mathbf{B} \sim 0)$  é identificado pela seta. A Figura 2B) contrasta o comportamento de  $E_k(T, \mathbf{B})$  reversível, em função da temperatura reduzida  $T/T_c$ , de três diferentes amostras monocristalinas. O  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  apresenta maior amplitude de  $E_k(T, 3 \text{ T})$  em comparação ao d  $\text{Y}_{0,95}\text{Ca}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  e, ao pesquisado neste trabalho.

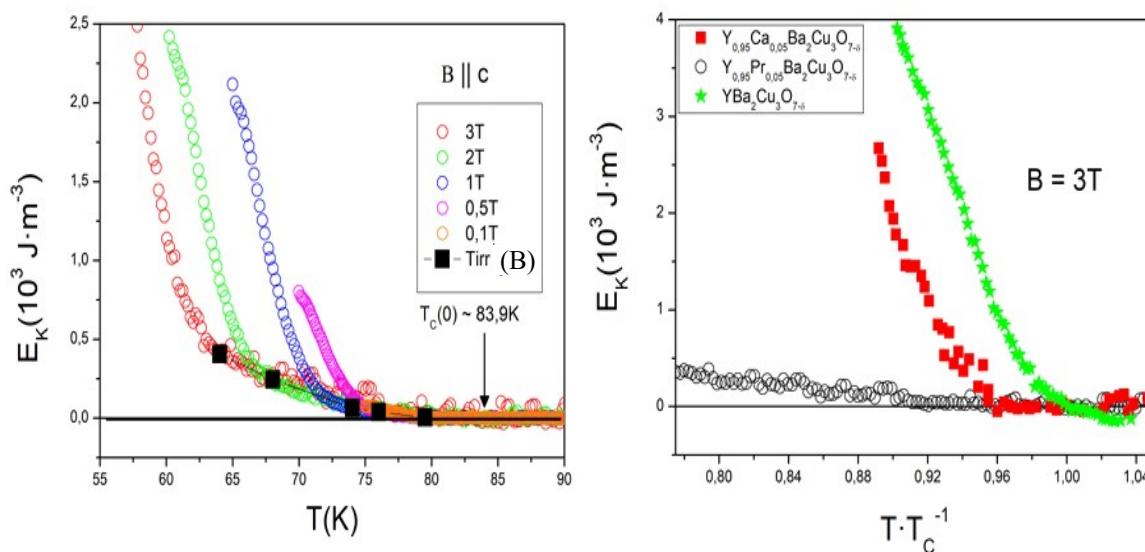


Figura 2 – A) Comportamento de  $E_k(T, \mathbf{B})$  frente a diferentes valores de campo magnéticos aplicados a amostra  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . B) O comportamento de  $E_k(T, \mathbf{B})$  com comportamento normalizado a  $T_c(\sim 0)$  para três diferentes amostras:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ,  $\text{Y}_{0,95}\text{Ca}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  e  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

Na Figura 2A) é possível verificar que o comportamento de  $E_k(T, \mathbf{B})$  aumenta a sua intensidade a medida em que a temperatura  $T$  diminui a partir de  $T_c(0)$  até mesmo para  $T < T_{\text{irr}}(\mathbf{B})$ . De acordo com a equação (1),  $E_k$  depende diretamente da magnitude da magnetização reversível ( $\mathbf{M}$ ) a qual aumenta em virtude de que o número de vórtices de blindagem por supercorrentes aumenta a medida em que  $T$  diminui enquanto o campo magnético aplicado permanece constante, aumentando desta forma,  $\mathbf{M}$  proveniente da amostra, SOUZA, R. P. (2023). Por outro lado a quase inexistente dependência de  $\mathbf{B}$  por parte de  $E_k(T)$  é justificada

pela baixa anisotropia planar ( $\gamma < 10$ ) do supercondutor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  associado ao caráter tridimensional apresentado pela dinâmica de vórtices, no intervalo de temperaturas de  $T_{\text{irr}}(\mathbf{B})$  e  $T_c(0)$ , nesse supercondutor, SOUZA, R. P. (2023).

#### 4. CONCLUSÕES

Na Figura 2B) é possível verificar que a substituição parcial do Y por 5% de Pr afeta fortemente o comportamento de  $E_k(T)$ . Foi observado uma drástica redução de  $T_c$  no monocrystal estudado quando comparado ao monocrystal de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . O comportamento de  $E_k(T, \mathbf{B})$  aumenta a medida em que  $T$  diminui de  $T_c(0)$  até  $T_{\text{irr}}(\mathbf{B})$  devido ao aumento do número de vórtices e consequentemente da magnetização. A fraca dependência de  $E_k(T, \mathbf{B})$  em relação a  $\mathbf{B}$  deve-se, provavelmente, a baixa anisotropia planar e ao caráter 3d da rede de vórtices desse material. A substituição parcial de 5% do Y por Pr mostra-se mais nociva para  $E_k(T, \mathbf{B})$  quando comparada ao efeito de dopagem com lacunas para mesma proporção de Ca no supercondutor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , o qual também reduz os valores de  $T_c$  e  $E_k(T, \mathbf{B})$ , mas não tão abruptamente.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DORIA, M. M.; GUBERNATIS, J. E.; RAINER, D. Virial theorem for Ginzburg-Landau theories with potential applications to numerical studies of type-II superconductors. **Physical Review B**, The American Physical Society, v. 39, n. 13, p. 9573, 1989.
- XU, X. Q. et al. Effect of pr doping on the growth and superconducting properties of  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . **Superconductor Science and Technology**, v. 22, n. 1, p. 015001, nov 2008.
- YU, Y.; CAO, G.; JIAO, Z. Hole distribution and  $T_c$  suppression in  $\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . **Phys. Rev. B**, American Physical Society, v. 59, p. 3845–3850, Feb 1999.
- HILSCHER, G. et al. Valence of praseodymium in  $\text{Pr}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ : Inelastic-neutron-scattering, specific-heat and susceptibility study. **Physical Review B**, The American Physical Society, v. 49, n. 1, p. 535, 1994.
- VIEIRA, V. N. **Efeitos das substituições químicas na irreversibilidade magnética e magnetocondutividade do supercondutor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .** 2004. Tese (Doutorado em Ciências) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- SOUZA, R. P.; VIEIRA, V. N. **O efeito da substituição parcial do Y por Pr sobre a densidade de energia cinética de condensação dos pares de cooper no composto supercondutor  $\text{Y}_{0,95}\text{Pr}_{0,05}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .** 2023. Monografia (Graduação em Física Bacharelado) – Curso de Bacharelado em Física, Universidade Federal de Pelotas.