

# O EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO Y POR Pr SOBRE A DENSIDADE DE ENERGIA CINÉTICA DE CONDENSAÇÃO DOS PARES DE COOPER NO COMPOSTO SUPERCONDUTOR $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-8}$

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](mailto: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](mailto: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  $YBa_2Cu_3O_{7-8}$  com substituição nominal de 5% do ítrio (Y) por praseodímio (Pr). Assim, o supercondutor  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-8}$  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 ( $B \leq 5T$ ), cujos resultados obtidos foram submetidos a aplicação do Teorema do Virial da Supercondutividade (TVS), descrito por DORIA et al. (1989).

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

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

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

Na literatura é observado que o Y quando substituído por elementos “Rare-Earth”, RE (Terra-Rara), na estrutura do  $YBa_2Cu_3O_{7-8}$  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  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-8}$  ainda não foi pesquisado em termos do comportamento de  $E_k(T, B)$ , o que nos propomos a realizar nesse trabalho. O estudo do comportamento de  $E_k(T, B)$  poderá fornecer informações relevantes sobre como essa substituição parcial de até 5% do Y por Pr afeta o mecanismo supercondutor do  $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ . Além disso, faremos equiparação do resultado obtido nesse trabalho com outros, citados na literatura, para monocristais de  $Y_{0,95}Ca_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-8}$ , SOUZA, R. P. (2023) e  $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ , SOUZA, R. P. (2023).

## 2. METODOLOGIA

Os monocristais de  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-6}$  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  $M_{zfc}(T)$  e “field cooled cooling” (FCC) para  $M_{fcc}(T)$  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 plaqueta 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  $M_{zfc}(T)$  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  $M_{fcc}(T)$  é registrada. A análise dos comportamento de  $M_{zfc}(T)$  e  $M_{fcc}(T)$  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  $M_{zfc}(T)$  ou  $M_{fcc}(T)$  o qual encontrasse localizado no intervalo compreendido entre  $T_{irr}(B) < T < T_c(B)$ , ou seja, entre as temperaturas de irreversibilidade magnética,  $T_{irr}(B)$ , 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  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-6}$  quando  $B \sim 0 (B = 0,001 \text{ T})$  é aplicado. Na Figura 1B) é destacado o critério empregado para a obtenção de  $T_{irr}(B)$ , a qual é obtida através da subtração entre  $M_{fcc}$  e  $M_{zfc}$ . No “inset” da mesma, são destacados os comportamentos das  $M_{zfc}(B = 1 \text{ T})$  e  $M_{fcc}(B = 1 \text{ T})$ .

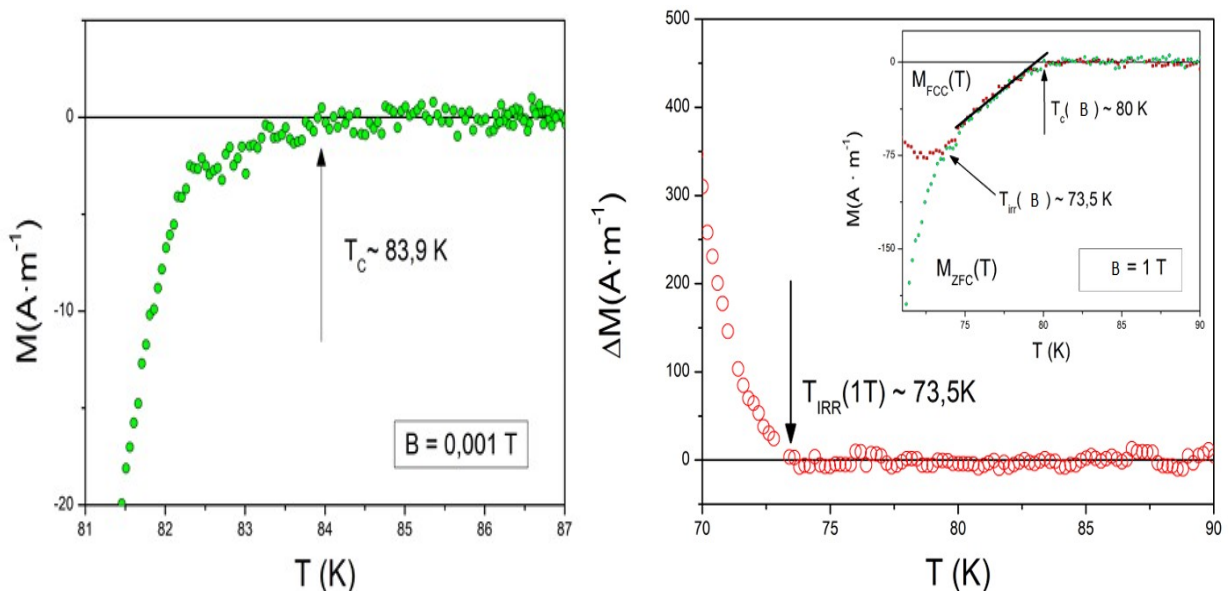


Figura 1 – A) A determinação de  $T_c$  da amostra  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-δ}$  quando  $B = 0,001$  T foi empregado. A seta indica aproximadamente o valor de  $T_c$ . O comportamento de  $M_{zfc}(T)$  para quando a aplicação do campo  $B = 0,001$  T é aplicado e o valor de  $T_c$  ( $\sim 0$ ) é obtido. B) O comportamento da diferença  $\Delta M = M_{fcc} - M_{zfc}$  quando  $B = 1$  T foi aplicado,  $T_{irr}(B = 1$  T) é identificado pela seta. O “inset” da figura mostra as magnetizações  $M_{zfc}$  e  $M_{fcc}$  empregados no cálculo de  $\Delta M$ .

O valor de  $T_c \sim 83,9$  K obtido para a amostra  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-δ}$  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  $T_{irr}$ . O emprego do TVS se dará quando os comportamentos de  $M_{zfc}(T)$  e  $M_{fcc}(T)$  forem reversíveis, ou seja, quando  $M_{zfc}(T)$  e  $M_{fcc}(T)$  forem praticamente coincidentes, veja no inset da Figura 1B VIEIRA, VALDEMAR (2004).

A Figura 2A) destaca os comportamentos de  $E_k(T, B)$  da amostra  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-δ}$  quando  $0,1T \leq B \leq 3T$  foram aplicados. Os símbolos no formato quadrado preto representam os valores de  $T_{irr}(B)$  ao passo que  $T_c(B \sim 0)$  é identificado pela seta. A Figura 2B) contrasta o comportamento de  $E_k(T, B)$  reversível, em função da temperatura reduzida  $T/T_c$ , de três diferentes amostras monocristalinas. O  $YBa_2Cu_3O_{7-δ}$  apresenta maior amplitude de  $E_k(T, 3$  T) em comparação ao d  $Y_{0,95}Ca_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-δ}$  e, ao pesquisado neste trabalho.

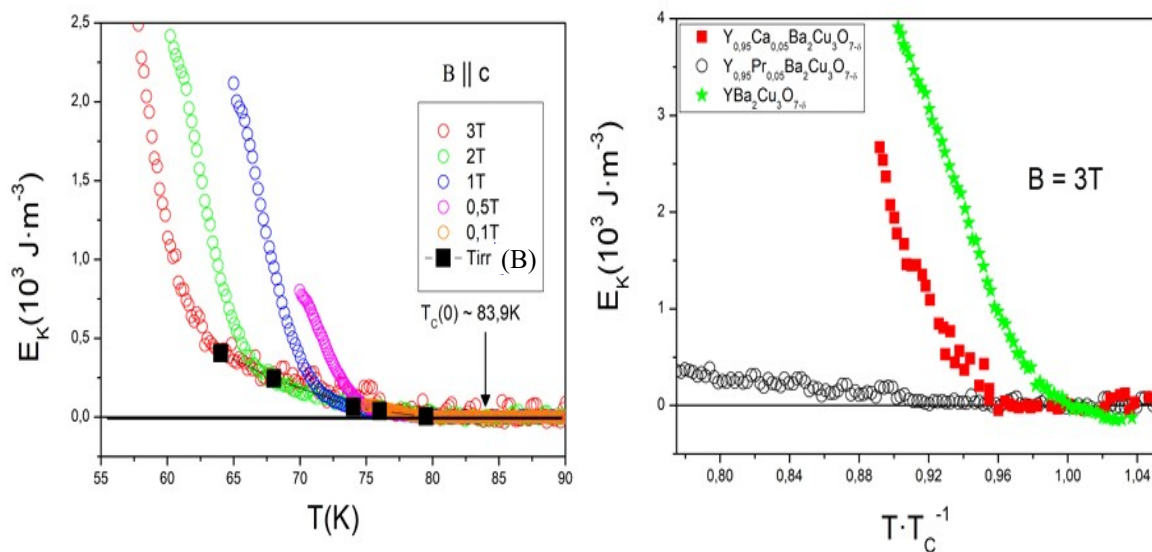


Figura 2 – A) Comportamento de  $E_k(T, B)$  frente a diferentes valores de campo magnéticos aplicados a amostra  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-δ}$ . B) O comportamento de  $E_k(T, B)$  com comportamento normalizado a  $T_c$  ( $\sim 0$ ) para três diferentes amostras:  $YBa_2Cu_3O_{7-δ}$ ,  $Y_{0,95}Ca_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-δ}$  e  $Y_{0,95}Pr_{0,05}Ba_2Cu_3O_{7-δ}$ .

Na Figura 2A) é possível verificar que o comportamento de  $E_k(T, B)$  aumenta a sua intensidade a medida em que a temperatura  $T$  diminui a partir de  $T_c(0)$  até mesmo para  $T < T_{irr}(B)$ . De acordo com a equação (1),  $E_k$  depende diretamente da magnitude da magnetização reversível ( $M$ ) 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,  $M$  proveniente da amostra, SOUZA, R. P. (2023). Por outro lado a quase inexistente dependência de  $B$  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 monocristal estudado quando comparado ao monocristal 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.