

## A ENERGIA CINÉTICA DE CONDENSAÇÃO DOS PARES DE COOPER DO SUPERCONDUTOR $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ SEGUNDO O TEOREMA VIRIAL DA SUPERCONDUTIVIDADE.

Mateus Bigolin Lorenzon<sup>1</sup>; Valdemar das Neves Vieira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UFPEl – [mateus\\_pbfl@hotmail.com](mailto:mateus_pbfl@hotmail.com)

<sup>2</sup>UFPEl – [vdnvieira@gmail.com](mailto:vdnvieira@gmail.com)

### 1. INTRODUÇÃO

O presente resumo descreve a realização de um estudo experimental da densidade de energia cinética de condensação dos Pares de Cooper [ $K(T, B)$ ], onde  $T$  é a temperatura e  $B$  ( $B = \mu_0 H$ ) é o campo indução magnética, sob ponto de vista do Teorema Virial da Supercondutividade (TVS) [1]. A amostra utilizada é um policristal de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ . O referido sistema é um supercondutor do tipo II, pertencente à família dos cupratos de alta temperatura crítica (HTSC) e apresenta um estado misto caracterizado por fortes efeitos de flutuações termodinâmicas (FT) nas suas propriedades de magnetização e resistividade elétrica [3].

O TVS nos diz que  $K(T, B)$  é definida como o produto escalar entre os vetores magnetização reversível,  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{B}$ , ou seja: [1,2,4]

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

A amostra empregada nesse trabalho foi sintetizada no laboratório de materiais supercondutores (LMS) da UFPEl e as medidas de magnetização DC foram realizadas no laboratório de supercondutividade e magnetismo (LSM) da UFRGS. A partir das medidas de magnetização foi possível determinar para a amostra em questão os seguintes parâmetros: o valor da temperatura de transição para o estado supercondutor,  $T_c$  e o comportamento de  $K(T, B)$ . Por outro lado, a partir do estudo do comportamento de  $K(T, B)$  foi possível também obter para este sistema o comportamento do campo crítico superior  $\mu_0 H_{c2}(T)$ . Este último parâmetro indica o máximo valor de campo magnético aplicado, em função da temperatura, no qual o material ainda exibe supercondutividade [3].

### 2. METODOLOGIA

A sinterização da amostra empregada nesse estudo ocorreu no LMS e foi realizada por meio da adoção do processo usual de reação de estado sólido. [2,3] Inicialmente, os reagentes de alta pureza:  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{SrCO}_3$  e  $\text{CaCO}_3$  tiveram os seus montantes determinados de maneira a satisfazerem a estequiometria  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  para uma amostra de 1g. A utilização de  $\text{PbO}$  permite a estabilização e crescimento da fase  $\text{Bi}_2\text{2223}$  [3]. Após terem a sua massa aferida, por meio de uma balança analítica, os reagentes precursores foram colocados num almofariz de ágata e foram macerados até que sua mistura apresentasse um aspecto homogêneo. Logo após, a mistura, acondicionada num cadinho de alumina, foi inserida no interior de um forno mufla, com controle de temperatura automatizado e capacitado para atingir uma temperatura de até  $1200^\circ\text{C}$ , com o objetivo de dar prosseguimento a dois processos específicos de sinterização cujos os ciclos térmicos empregados encontram-se especificados na referência 3.

Após concluído os dois processos de sinterização a mistura obtida foi macerada e então compactada, com o auxílio de uma prensa hidráulica de

bancada, no formato de um disco, com raio de aproximadamente 0,5cm. Na última etapa do processo de reação de estado sólido, a amostra foi mantida a 850°C, por 160 h, para logo após, a uma taxa de -40 °C/h, ser resfriada até 400°C para a seguir, a uma taxa de -150 °C/h, ser resfriada até que a sua temperatura se iguale a do ambiente.

As medidas de magnetização DC foram realizadas com o auxílio de um magnetômetro SQUID o qual encontra-se instalado no LSM do IF na UFRGS. A magnetização da amostra, para campos magnéticos aplicados de até  $\mu_0 H = 5T$ , foi medida com a adoção de dois procedimentos experimentais: o ZFC e o FCC. No procedimento ZFC a amostra, no formato de um paralelepípedo, foi resfriada na ausência  $\mu_0 H$  de uma  $T > T_C$  até uma  $T < T_C$ . Ao atingir-se  $T < T_C$  um  $\mu_0 H$  é aplicado na direção longitudinal da amostra e  $M_{ZFC}(T)$  é registrada durante o aquecimento da amostra até uma determinada  $T > T_C$ . Imediatamente após a conclusão do procedimento ZFC têm início o procedimento FCC. Desta forma, sem realizar qualquer ajuste no valor de  $\mu_0 H$  aplicado, resfria-se a amostra a partir de uma  $T > T_C$ , agora sobre a aplicação de  $\mu_0 H$ , registrando-se  $M_{FCC}(T)$  durante o resfriamento da amostra até que uma determinada  $T < T_C$  seja atingida.

A análise dos dados e a montagem dos gráficos foi realizada utilizando um software compatível para este fim.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

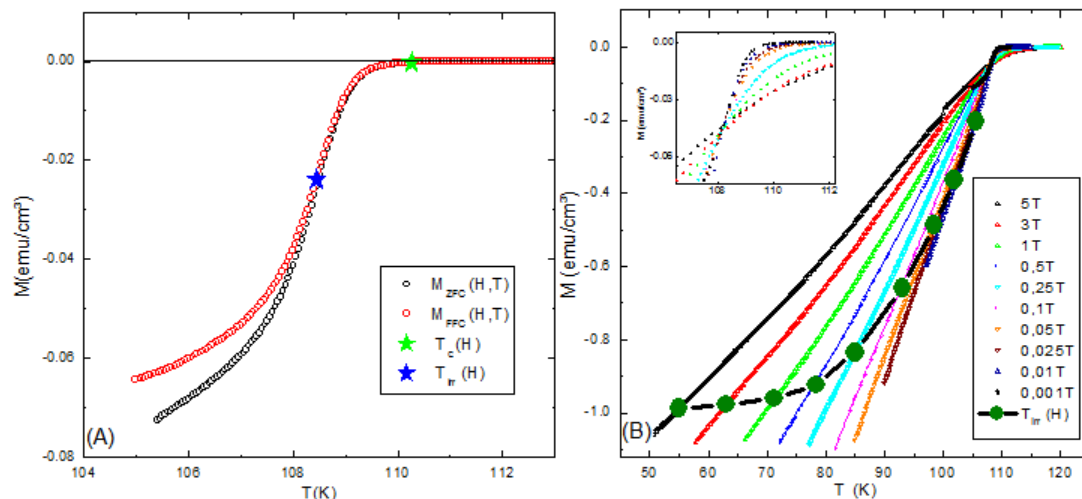
Na Figura 1 é apresentado o comportamento de  $M_{ZFC}(T)$ ,  $M_{FCC}(T)$ ,  $T_C(\mu_0 H)$  e  $T_{IRR}(\mu_0 H)$  para a amostra de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  quando: A)  $\mu_0 H = 10^{-3}T$  e B)  $\mu_0 H \leq 5T$  são aplicados. O “inset” da figura 1-B destaca os efeitos das FT no comportamento de  $M_{ZFC}(T)$  nas imediações da transição supercondutora da amostra pesquisada.

O valor de  $T_C(\mu_0 H \sim 0T)$  é definido como o valor  $T$  no qual, dentro da precisão experimental adotada, a  $M(T)$  abandona a linha de base da zero da figura 1-A. O valor de  $T_C(\mu_0 H \sim 0T) \sim 110K$ , símbolo verde na figura, está de acordo com valores reportados na literatura para este supercondutor [3] o que indica que nossa amostra é de boa qualidade.

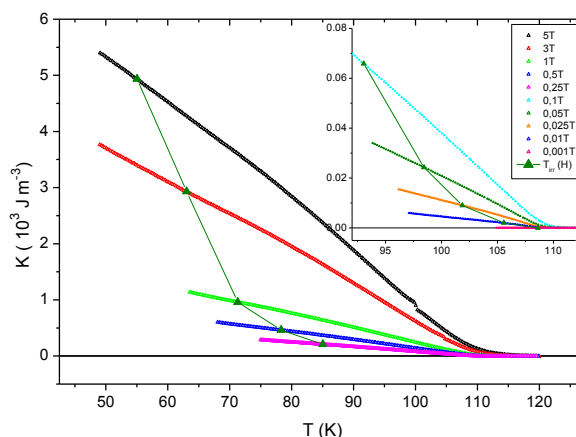
Na figura 1-A também é destacada a temperatura na qual os comportamentos de  $M_{ZFC}(T)$  e  $M_{FCC}(T)$  tornam-se diferentes ou coincidentes, símbolo azul na figura. Esta temperatura recebe a denominação de temperatura de irreversibilidade magnética,  $T_{IRR}(H)$  é separa o comportamento reversível [ $T(\mu_0 H) > T_{IRR}(\mu_0 H)$ ] do irreversível [ $T(\mu_0 H) < T_{IRR}(\mu_0 H)$ ] por parte de  $M_{ZFC}(T)$  e  $M_{FCC}(T)$ . A magnetização reversível não depende do histórico térmico-magnético no qual o supercondutor foi submetido.[3] Este comportamento, do ponto de vista termodinâmico, é caracterizado como de equilíbrio. Nesse trabalho iremos empregar a  $M(T)$  reversível para a determinação de  $K(T,B)$ , conforme exige o TVS.[1]

A figura 1-B destaca o comportamento de  $M_{ZFC}(T)$  quando  $\mu_0 H \leq 5T$  são aplicados. Os símbolos fechados, correspondentes a  $T_{IRR}(\mu_0 H)$ , indicam o comportamento reversível da magnetização da amostra obtido em função de  $T$  e  $\mu_0 H$ , portanto, dentro do limite de validade da interpretação de  $K(T,B)$ . No “inset” desta figura encontra-se destacado o efeito FT sobre a transição supercondutora de nossa amostra uma vez que  $T_C(\mu_0 H)$ , de acordo com o critério especificado para a sua determinação, irá aumentar em função de  $\mu_0 H$  o que não está de acordo com as teorias da supercondutividade as quais interpretam esta propriedade. [1-4]

A figura 2 ilustra o comportamento de  $K(T,B)$  para a nossa amostra policristalina de  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ . Esse comportamento foi obtido a partir do emprego da  $M_{ZFC}(T, \mu_0 H)$  em conjunto com a equação (1).



**Figura 1:** O comportamento de  $M_{ZFC}(T)$ ,  $M_{FCC}(T)$ ,  $T_c(\mu_0H)$  e  $T_{IRR}(\mu_0H)$  para a amostra  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  quando: A)  $\mu_0H = 10^{-3}\text{T}$  e B)  $\mu_0H \leq 5\text{T}$  são aplicados. O “inset” da figura B) destaca os efeitos das FT na  $M_{ZFC}(T)$  nas imediações da transição supercondutora da amostra em questão.



**Figura 2:** O comportamento de  $K(T,B)$  para a amostra  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  ilustrado na figura principal quando  $0,25\text{T} \leq \mu_0H \leq 5\text{T}$  foram aplicados. O “inset” da figura destaca esse comportamento quando  $0,001\text{T} \leq \mu_0H \leq 0,1\text{T}$  foram aplicados.

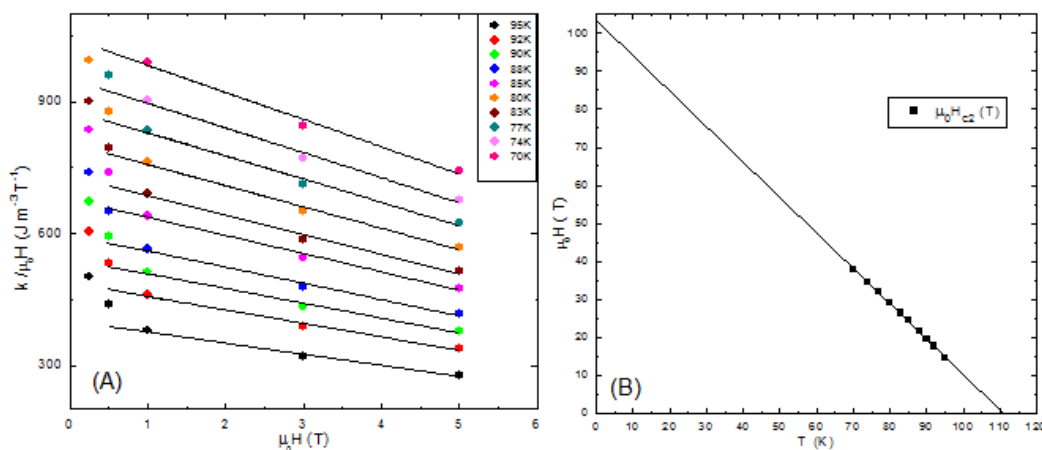
É importante verificar que  $K(T,B)$  apresenta um comportamento crescente em função da aplicação de  $\mu_0H$  e do intervalo de temperatura  $T_{IRR}(\mu_0H) < T < T_c(\mu_0H)$ . Comportamento semelhante a este foi observado ocorrer em amostras policristalinas de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  [2] e  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  [4] e monocristais de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  [4]. Este aumento provavelmente está relacionado ao maior dispêndio de energia por parte do estado supercondutor para confinar localmente a energia magnética dos vórtices a qual aumenta consideravelmente em função do  $\mu_0H$  aplicado. Por outro lado, é importante destacar que o efeito das FT sobre  $K(T,B)$  nas proximidades de  $T_c(\mu_0H)$  na figura 2 é praticamente inexistente quando comparado ao observado para o comportamento da  $M_{ZFC}(T)$  na figura 1-B. Desta forma é possível obter-se através do resultado de  $K(T,B)$ , ilustrado na figura 2, o comportamento de  $\mu_0Hc_2(T)$  para o  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ .

O parâmetro  $\mu_0Hc_2(T)$  está diretamente relacionado a  $T_c(\mu_0H)$  no diagrama  $\mu_0H-T$  dos HTSC. Desta forma, levando em consideração a afirmação anterior e utilizando a aproximação de Abrikosov [1,2,4], obtêm-se a seguinte relação: [1,2,4]

$$K = \frac{\mu_0}{2k^2} H (H_{c2} - H) \quad (2)$$

Na equação (2)  $k$  é o parâmetro de Ginzburg-Landau. É possível verifica-se de acordo com a equação (2) que o gráfico de  $K/\mu_0 H$  vs.  $\mu_0 H$  deve apresentar um comportamento linear com pendente negativa cuja intersecção com o eixo de  $K/\mu_0 H$ , no limite  $\mu_0 H = 0$ , fornece  $\mu_0 H_{c2}(T)$ .

A figura 3-A ilustra o comportamento de  $K/\mu_0 H$  vs.  $\mu_0 H$  para  $70\text{K} \leq T \leq 95\text{K}$  ao passo que a figura 3-B apresenta a disposição dos valores de  $\mu_0 H_{c2}(T)$  ao longo do diagrama  $\mu_0 H$ - $T$  para a nossa amostra de  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ .



**Figura 3:** A) o comportamento de  $K/\mu_0 H$  vs.  $\mu_0 H$  para  $70\text{K} \leq T \leq 95\text{K}$ . B) o comportamento de  $\mu_0 H_{c2}(T)$  ao longo do diagrama  $\mu_0 H$ - $T$  da amostra de  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ .

A extrapolação do comportamento linear da disposição dos dados de  $K/\mu_0 H$  vs.  $\mu_0 H$  em relação ao eixo  $K/\mu_0 H$  na figura 3-A forneceu o valor da razão  $H_{c2}(T)/2k^2$ . A partir do emprego do valor tabelado de  $k$  para o  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  [3] foi possível determinar-se o valor de  $H_{c2}(T)$  para cada uma das temperaturas compreendidas entre  $70\text{K} \leq T \leq 95\text{K}$ . A representação da disposição dos dados de  $H_{c2}(T)$ , ao longo do diagrama  $H$ - $T$  da figura 3-A, por meio de um ajuste linear para a nossa amostra de  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ , no intervalo de temperatura pesquisado, está de acordo com as previsões teóricas vigentes. [2,4] O mesmo foi observado para os valores de  $T_c(0) \sim 110,6\text{K}$  e  $\mu_0 H_{c2}(0) \sim 105\text{T}$  obtidos com a extrapolação deste comportamento em relação aos eixos de  $T$  e  $H$ . [3]

#### 4. CONCLUSÕES

A realização de um estudo experimental de  $M(T, H)$  empregando uma amostra policristalina de  $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  permitiu que o comportamento de  $K(T, B)$  fosse pesquisado para  $\mu_0 H \leq 5\text{T}$ . Este comportamento mostrou-se fortemente dependente do valor de  $\mu_0 H$  aplicado e também permitiu que o comportamento de  $H_{c2}(T)$  para esse material fosse obtido a partir dos resultados de  $K(T, B)$ .

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. M. Dória, J. E. Gubernatis and D. Rainer *Phys. Rev. B*, **39**(13), 9573-9575, May 1989.
- [2] Mendonça, A. P. A. **Os efeitos da desordem química na energia cinética de condensação dos pares de Cooper no supercondutor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$** . 08-2013. Dissertação (Mestrado em Física). PPGF. UFPEL.
- [3] Jurelo, A. R. **Efeitos de flutuações térmicas em supercondutores de alta temperatura crítica**. 1998. Tese (Doutorado em Física). IF, UFRGS.
- [4] Peña, J. P. **Estudo da energia cinética do condensado nos sistemas supercondutores  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  e  $\text{Ba Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}_2$** . 2012. Dissertação (Mestrado em Física) – IF, UFRGS.