

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 Lorenzon¹; Valdemar das Neves Vieira²

¹UFPel – mateus_pbfl@hotmail.com

²UFPel – 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: BiO_3 , PbO , CuO , SrCO_3 e 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 PbO permite a estabilização e crescimento da fase Bi2223 [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 cadiño de alumina, foi inserida no interior de um forno mufla, com controle de temperatura automatizado e capacitado para atingir uma temperatura de até 1200°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 $\mu_0H = 5T$, 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 μ_0H de uma $T > T_c$ até uma $T < T_c$. Ao atingir-se $T < T_c$ um μ_0H 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 μ_0H aplicado, resfria-se a amostra a partir de uma $T > T_c$, agora sobre a aplicação de μ_0H , 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 $M_{ZFC}(T)$, $M_{FCC}(T)$, $T_c(\mu_0H)$ e $T_{IRR}(\mu_0H)$ para a amostra de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ quando: A) $\mu_0H = 10^{-3}\text{T}$ e B) $\mu_0H \leq 5\text{T}$ são aplicados. O “inset” da figura 1-B destaca os efeitos das FT no comportamento de $M_{ZFC}(T)$ nas imediações da transição supercondutora da amostra pesquisada.

O valor de $T_c(\mu_0H \sim 0\text{T})$ 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 $T_c(\mu_0H \sim 0\text{T}) \sim 110\text{K}$, 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 [$T(\mu_0H) > T_{IRR}(\mu_0H)$] do irreversível [$T(\mu_0H) < T_{IRR}(\mu_0H)$] 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 $\mu_0H \leq 5\text{T}$ são aplicados. Os símbolos fechados, correspondentes a $T_{IRR}(\mu_0H)$, indicam o comportamento reversível da magnetização da amostra obtido em função de T e μ_0H , 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 $T_c(\mu_0H)$, de acordo com o critério especificado para a sua determinação, irá aumentar em função de μ_0H 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 $M_{ZFC}(T,\mu_0H)$ em conjunto com a equação (1).

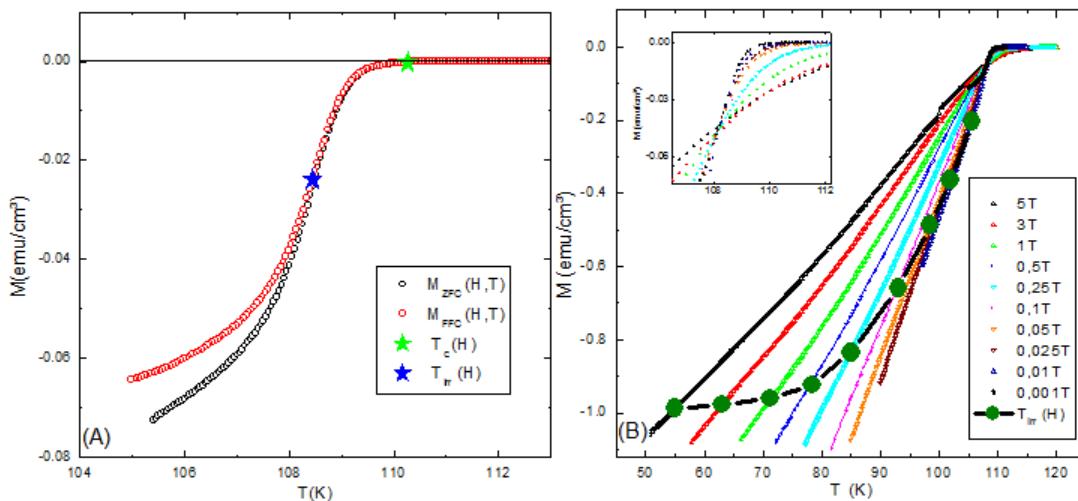


Figura 1: O comportamento de $M_{ZFC}(T)$, $M_{FCC}(T)$, $T_c(\mu_0 H)$ e $T_{irr}(\mu_0 H)$ para a amostra $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ quando: A) $\mu_0 H = 10^{-3}\text{T}$ e B) $\mu_0 H \leq 5\text{T}$ são aplicados. O “inset” da figura B) destaca os efeitos das FT na $M_{ZFC}(T)$ nas imediações da transição supercondutora da amostra em questão.

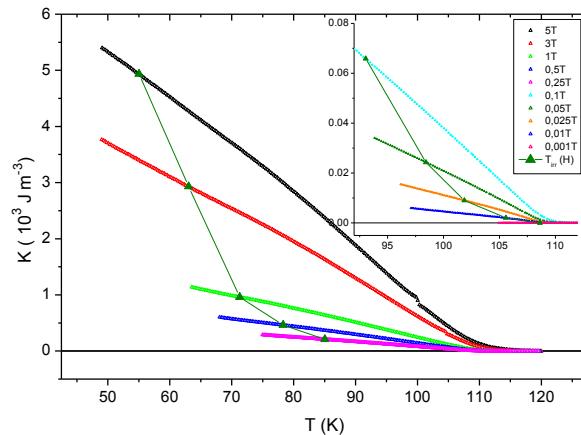


Figura 2: O comportamento de $K(T,B)$ para a amostra $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ ilustrado na figura principal quando $0,25\text{T} \leq \mu_0 H \leq 5\text{T}$ foram aplicados. O “inset” da figura destaca esse comportamento quando $0,001\text{T} \leq \mu_0 H \leq 0,1\text{T}$ foram aplicados.

É importante verificar que $K(T,B)$ apresenta um comportamento crescente em função da aplicação de $\mu_0 H$ e do intervalo de temperatura $T_{irr}(\mu_0 H) < T < T_c(\mu_0 H)$. 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 $\mu_0 H$ aplicado. Por outro lado, é importante destacar que o efeito das FT sobre $K(T,B)$ nas proximidades de $T_c(\mu_0 H)$ 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 $\mu_0 H_{c2}(T)$ para o $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$.

O parâmetro $\mu_0 H_{c2}(T)$ está diretamente relacionado a $T_c(\mu_0 H)$ no diagrama $\mu_0 H-T$ dos HTSC. Desta forma, levando em consideração a afirmação anterior e utilizando a aproximação de Abrikosov [1,2,4], obtém-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 $70K \leq T \leq 95K$ 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 $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$.

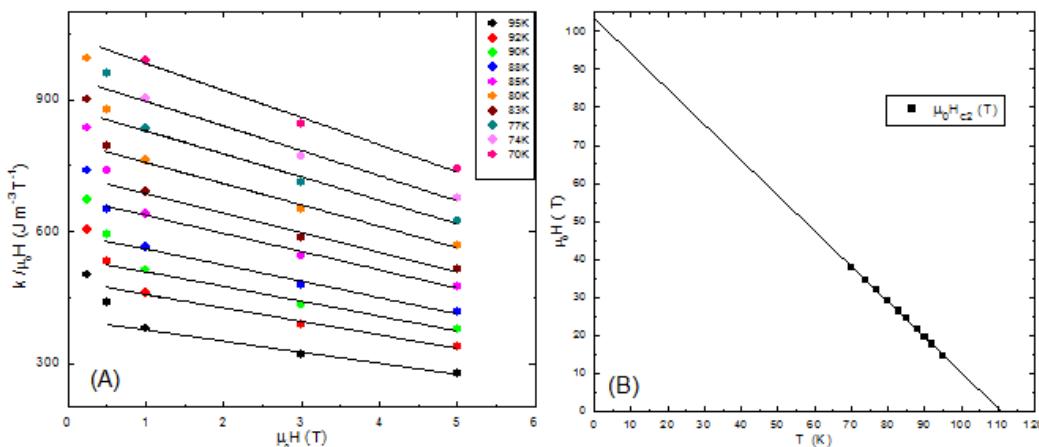


Figura 3: A) o comportamento de $K/\mu_0 H$ vs. $\mu_0 H$ para $70K \leq T \leq 95K$. B) o comportamento de $\mu_0 H_{c2}(T)$ ao longo do diagrama $\mu_0 H$ - T da amostra de $\text{Bi}_{1.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$.

A extração 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 $70K \leq T \leq 95K$. 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 $T_c(0) \sim 110.6K$ e $\mu_0 H_{c2}(0) \sim 105T$ obtidos com a extração 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 $\mu_0 H \leq 5T$. 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.