

# ESTUDO DO EFEITO HALL E A CONTRIBUIÇÃO DO MECANISMO DE QUEBRA DE PARES DE COOPER NA FASE NORMAL DO SUPERCONDUTOR $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2,97}\text{Zn}_{0,03}\text{O}_{7-\delta}$

MARCELO AUGUSTO PEREIRA DOS SANTOS<sup>1</sup>; JOÃO EDUARDO DE MAGALHÃES SALVADOR<sup>2</sup>; ROBERLÂNDIA DA SILVA BARROS<sup>3</sup>; RENNAN PEREIRA DE SOUZA<sup>4</sup>; FABIANO MESQUITA ROSA<sup>5</sup>; VALDEMAR DAS NEVES VIEIRA<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas – [augustomarcelo061@gmail.com](mailto:augustomarcelo061@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – [jemsalvador@gmail.com](mailto:jemsalvador@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas – [roberlandiabarros249@gmail.com](mailto:roberlandiabarros249@gmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal de Pelotas – [rennan.souza@ufpel.edu.br](mailto:rennan.souza@ufpel.edu.br)

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – [fabiano.mesquita@ufrgs.br](mailto:fabiano.mesquita@ufrgs.br)

<sup>6</sup> Universidade Federal de Pelotas – [vdnvieira@gmail.com](mailto:vdnvieira@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

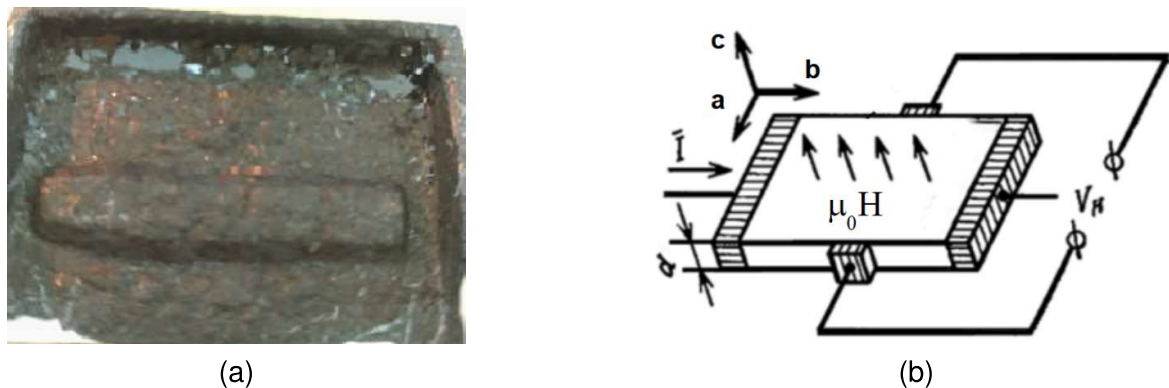
Supercondutores de alta temperatura crítica (HTSC, do inglês "High Temperature Superconductors"), são um dos materiais mais pesquisados de todos os tempos (MALIK, 2014). Porém algumas questões referentes ao estabelecimento da supercondutividade nestes sistemas não estão totalmente esclarecidas. Uma delas diz respeito ao papel que o fenômeno do pseudo-gap desempenha sobre a dinâmica dos portadores de carga na fase normal (temperatura acima da temperatura crítica de transição,  $(T > T_c)$ ). Uma das formas de pesquisar esta questão consiste em realizar medidas de resistividade elétrica Hall ( $\rho_H$ ) (SOBOCINSKI, 2014). Resultados recentes do coeficiente Hall [ $R_H(T)$ ] na fase normal de supercondutores de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  ( $-1 \leq \delta \leq 1$ ) (BSCCO) (LOPES, 2018) e de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $0 \leq \delta \leq 1$ ) (YBaCuO) (SOBOCINSKI, 2014) revelam através da análise do comportamento de  $R_H(T)$  que a variação da concentração de portadores afeta fortemente a dinâmica dos mecanismos de condução eletrônica e esta variação por sua vez esta relacionada a dinâmica apresentada pela temperatura do pseudo-gap ( $T^*$ ) (SOBOCINSKI, 2014). Desta forma, interessados por estes acontecimentos, realizamos um estudo experimental direcionado a pesquisa do comportamento de  $R_H(T)$  na fase normal de um monocristal de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2,97}\text{Zn}_{0,03}\text{O}_{7-\delta}$  [YBa(CuZn)O]. Para isso empregamos medidas de ( $\rho_H$ ) em função do campo magnético ( $\mu_0 H$ ) com o propósito de verificar a contribuição do mecanismo de quebra de pares de Cooper, devido a substituição parcial do cobre (Cu) por zinco (Zn) sobre a dinâmica dos portadores de carga e sua correlação com o fenômeno de pseudo-gap na fase normal do YBaCuO.

## 2. METODOLOGIA

O monocristal de YBa(CuZn)O foi crescido no Laboratório de Materiais Supercondutores (LMS) da UFPel. A síntese da amostra foi realizada por meio de reação de estado sólido, utilizando a técnica de auto-fluxo (KEESTER, 1988). Os monocristais

obtidos, são semelhantes aos destacados (zonas mais brilhantes) na Figura 1 (a). Os monocristais selecionados para as medidas de  $\rho_H(\mu_0 H)$  apresentam formato de plaquetas com área superficial de aproximadamente  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  e espessura menor que  $0,1\text{mm}$ . Quatro contatos elétricos foram implementados sobre a sua área superficial (plano  $ab$ ) como esquematizado na Figura 1 (b), onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  representam a orientação dos eixos cristalográficos,  $d$  a espessura da amostra,  $V_H$  representa a tensão transversal,  $I$  a corrente de medida. As medidas de  $\rho_H$  fo-

Figura 1: (a) Monocristais (zonas brilhantes) de YBa(CuZn)O, crescidos através da técnica de auto-fluxo. (b) Representação esquemática do arranjo para medida experimental do efeito Hall.



Fonte: (a) (JAECKEL, 2021). (b) adaptação do autor de (MATURITY, 2012).

ram realizadas com o auxílio do módulo elétrico de transporte (ETO) da plataforma Physical Property Measurement System (PPMS) no Laboratório de Supercondutividade e Magnetismo da UFRGS. As medidas foram executadas em temperaturas constantes entre  $100\text{K} < T < 300\text{K}$ , enquanto  $I = 1\text{mA}$  foi aplicada na amostra e submetida a uma variação de  $\mu_0 H$  entre  $-9\text{T} \leq \mu_0 H \leq +9\text{T}$ , sendo a resistência elétrica ( $R$ ) registrada para cada valor de  $\mu_0 H$  aplicada. Através da equação 1, foi possível determinar o valor de  $\rho_H(\mu_0 H)$ , onde  $J$  é a densidade de corrente.

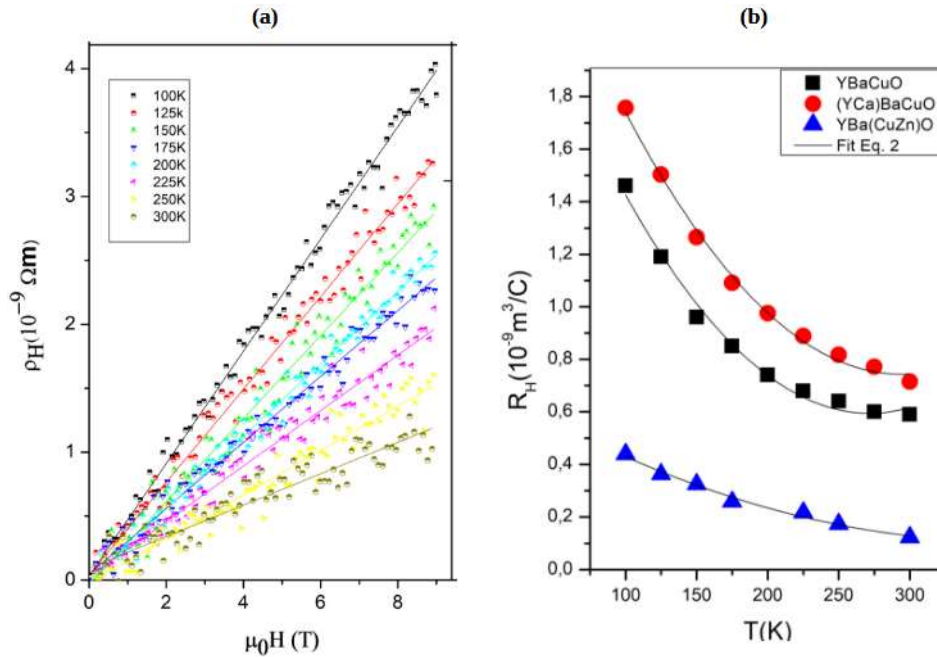
$$\rho_H = \frac{V_H}{Jd} \quad (1)$$

Os ajustes lineares que descrevem o comportamento dos dados de  $\rho_H(\mu_0 H)$ , mostrado na Figura 2 (a), permitem a determinação do  $R_H(T)$  a partir do emprego da equação 2.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 (a) plotamos o comportamento de  $\rho_H(\mu_0 H)$  para as diferentes temperaturas entre  $100\text{K} < T < 300\text{K}$  para a amostra YBa(CuZn)O, através dos dados obtidos do PPMS. Na Figura 2 (b) apresentamos o comportamento do coeficiente Hall em função da temperatura [ $R_H(T)$ ] para o YBa(CuZn)O e também de outros dois monocristais, sendo eles YBaCuO, e  $\text{Y}_{0,99}\text{Ca}_{0,01}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ((YCa)BaCuO), cujos dados são adaptados da literatura (JAECKEL, 2021). Em relação aos resultados de  $\rho_H(\mu_0 H)$  da Figura 2 (a) podemos observar também que há uma inclinação linear

Figura 2: (a) Dados de  $\rho_H(\mu_0 H)$  para o YBa(CuZn)O. (b) Comportamento de  $R_H(T)$  para os monocristais (YCa)BaCuO, YBaCuO e YBa(CuZn)O.



Fonte: (a): O autor 2025. (b): (JAECKEL, 2021).

positiva com dependência térmica. Esse comportamento foi observado também para o (YCa)BaCuO (JAECKEL, 2021), entretanto com uma dependência menor de  $T$ , descrito pela equação 2:

$$\rho_H = R_H \mu_0 H, \quad (2)$$

Utilizando a equação 3 para ajustar os dados de  $R_H(T)$  da Figura 2 (b), sendo essa dada por:

$$R_H(T) = R_0 + A e^{-\frac{T}{\Delta}}, \quad (3)$$

onde  $R_0$  corresponde ao coeficiente de Hall ordinário,  $A$  representa a amplitude do termo anômalo associado ao fenômeno, e  $\Delta$  é um parâmetro que quantifica a escala de decaimento de  $R_H$  em função do aumento da temperatura. Os resultados listados na Tabela 1 para  $T_c$ ,  $R_0$ ,  $A$  e  $\Delta$  obtido através da equação 3, revelam que o efeito proveniente da quebra de pares, devido ao Zn, diminui não só a  $T_c$  mas também a  $R_0$  e o  $A$  associado a natureza das interações magnéticas na fase normal (JAECKEL, 2021). Observa-se também um aumento significativo no valor da temperatura do pseudo-gap ( $\Delta$ ), o que provavelmente está conectado ao fato do aumento desse gap em virtude do estabelecimento de um caráter subdaptado em relação em relação a concentração de portadores de carga no YBaCuO.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo experimental do  $R_H(T)$  na fase normal do YBa(CuZn)O. Através de medidas experimentais, foi possível observar o comportamento linear característico de  $\rho_H$  em função do  $\mu_0 H$ , cuja inclinação exibe uma

Tabela 1: Parâmetros obtidos dos ajustes do coeficiente de Hall.

Monocristal	$T_c$ (K)	$R_0$ ( $10^{-9} \text{ m}^3/\text{C}$ )	$A$ ( $10^{-9} \text{ m}^3/\text{C}$ )	$\Delta$ (K)
YBaCuO	93,00	$0,539 \pm 0,012$	$4,141 \pm 0,224$	$66,749 \pm 2,602$
(YCa)BaCuO	$92,48 \pm 0,10$	$0,593 \pm 0,021$	$3,554 \pm 0,141$	$90,214 \pm 4,058$
YBa(CuZn)O	$85,60 \pm 0,20$	$0,0134 \pm 0,0652$	$0,803 \pm 0,05$	$154,59 \pm 42,36$

Fonte: o autor, 2025.

dependência térmica não trivial. A análise dos dados de  $R_H(T)$  por meio do modelo apresentado, permitiu extrair parâmetros de consistência no comportamento do monocristal. Os resultados, quando comparados com dados da literatura para amostras de YBaCuO puro e dopado com Cálcio (Ca), revelam o impacto significativo da substituição parcial. Podemos afirmar que a dopagem com Zn, mesmo em baixa concentração (1%), causa uma redução na densidade de portadores de carga ( $R_0$ ) efetiva e no termo anômalo ( $A$ ) do coeficiente Hall. Além disso, observou-se um aumento significativo no parâmetro  $\Delta$ , podendo ser interpretado como estando intimamente relacionado à escala de energia do pseudo-gap. Este aumento indica que a dopagem efetivamente torna o sistema mais subdopado, elevando a  $T^*$  e reforçando a correlação entre a quebra de pares de Cooper pela substituição do Cu por Zn.

## 5. REFERÊNCIAS

JAECKEL, S. T. **O Efeito da Dopagem Química sobre Propriedades Magnéticas e Elétricas dos Estados Supercondutor e Normal de Monocristais de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$** . Tese (Doutorado), 2021. 290f. - Curso de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Pelotas.

KEESTER. **Growth and characterization of large  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  single crystals**. Journal of Crystal Growth, v. 91, n. 3, p. 295-301, 1988.

LOPES, L. F. **Estudo experimental do pseudogap no supercondutor de alta temperatura crítica  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$** . Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. 176f. Programa de Pós-Graduação em Física, UFRGS.

MALIK, M. A. **High temperature superconductivity: Materials, mechanism and applications**. Bulgarian Journal of Physics, v. 41, n. 4, 2014.

MATURITY, A. J. S. **Construção de um sistema de caracterização das propriedades de transporte de filmes finos pelo efeito hall**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, p. 1-8, 2012.

SOBOCINSKI, P. d. A. **Estudo dos fenômenos de magnetotransporte em filmes finos de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  com diferentes concentrações de oxigênio**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. 157f. - Programa de Pós-Graduação em Física, UFRGS.