

T10

Supercondutividade

Objetivos:

- Contactar com criogenia e entender os conceitos básicos teóricos da supercondutividade
- Compreender os riscos e aprender os procedimentos de segurança a adotar com Nitrogénio líquido
- Medir resistências muito pequenas numa amostra de Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O a baixas temperaturas.
- Estudar a variação da resistência da amostra com a temperatura

Background Importante:

↳ Informação detalhada sobre a história da supercondutividade, o Efeito Meissner e a Teoria de BCS no protótipo

Key Points:

- Um superconductor é um material com resistência/resistividade nula.
- Na ausência de campo magnético uma amostra pode-se tornar supercondutora abaixo de uma temperatura crítica. (Na presença de campo, a supercondutividade depende do campo crítico dado pela equação (1) do protótipo)
- Ao contrário dos condutores perfeitos, o campo magnético dentro de um superconductor é sempre zero.
- O volume de Azoto expande 694 vezes na transição líquido → gasoso → Em recipientes fechados pressão aumenta bastante
- O risco de asfixia por Azoto é elevado devido à sua expansão e falta de cor e cheiro
- A temperaturas baixas o risco de queimadura fria é elevado. Deve-se ter cuidado com salpicos, encapuzamento de tecidos e contacto com pele, olhos e roupas.
- Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O tem uma temperatura crítica de $\approx 108\text{K}$

Cuidados
com
o
manuseamento
de Azoto
contato c/
metal

crescimento de fluxo

Material e Montagem:

- ① amostra
- ② termômetro platina Pt100

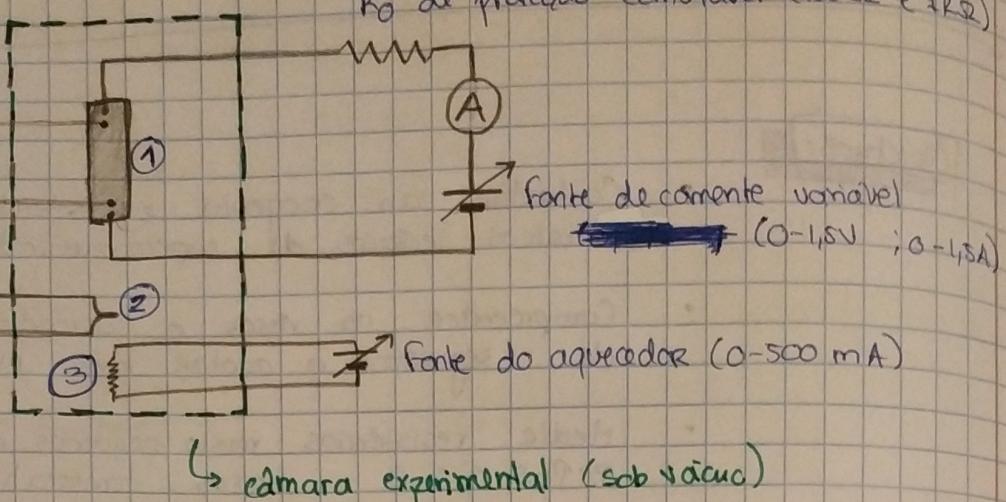
HP34401A

Keithley 179

Agilent 34403A

1 destes

\checkmark
1μV - 1mV



HP34401A

Ω

4W

③ Resistência de Aquecimento

④ Garrafa thermos como

⑤ Tabela de Calibração Azoto líquido (aquecimento da câmara do Termômetro)

Registo Experimental

Devido aos riscos acrescidos pelo manuseamento do azoto líquido e ao regime em que a experiência tem de ser realizada, a montagem do esquema acima já se encontrava preparada.

Antes de iniciarmos a recolha de dados o prof. Rui explicou-nos os cuidados e equipamentos a serem empregados em criogenia. Em particular:

→ funcionamento de recipientes Dewar - função de cada uma das válvulas (manual, secundária e válvulas de aumento e diminuição de pressão)

→ Cuidados de manuseamento de recipientes com azoto líquido :

- contacto direto com a pele não é muito perigoso (pois o azoto evapora em proximidade da pele criando uma camada protetora que protege a pele) no entanto deve-se ter cuidado em não enxardar roupas e não tocar em materiais condutores (como metais) que estejam em contacto direto com o nitrogênio;
- evitar contacto direto com os olhos;
- outros perigos através mencionados.

Antes da recolha de dados, o prof. Rui colocou azoto líquido na câmara experimental, para ameфecer o sistema.

Todos os equipamentos encontravam-se j o ligados (para terem tempo de aquecer e estabilizar. (continua o na pág. 81)

Continuação T10

Inicialmente, sem ser aplicada corrente na amostra registámos:

$$V_{\text{amostra}} = (-4 \pm 1) \mu V$$

sensibilidade
do aparelho

$$R_{\text{termômetro}} = (31,82 \pm 1) \Omega$$

sensibilidade
do aparelho

De acordo com a folha de calibração do termômetro, este valor de resistência corresponde a uma temperatura entre os 100 e os 105 K, ou seja, abaixo da T_c da amostra.

De seguida, ligamos a fonte de corrente da amostra - $I = (49,7 \pm 0,1) \text{ mA}$, cujo valor da corrente se manteve constante no decorrer da atividade.

Verificámos que o valor da tensão da amostra se manteve o mesmo!

(Aqui, o valor de $-4 \mu V$ será devido a uma má calibração do multímetro / voltmetro utilizado. Este valor corresponderá a $0 \mu V$. Na análise realizada posteriormente o 0 foi redimensionado, adicionando-se $4 \mu V$ a todos os valores)

Isto indica que, mesmo com passagem de corrente $R = \frac{V}{I}$ (de acordo com a lei de Ohm) $R = \frac{0}{I} = 0$!

Confirma-se portanto, que à temperatura inicial da amostra encontrava-se já no estado supercondutor.

Tendo confirmado este facto, passámos à recolha de dados. Aumentámos a corrente na resistência de aquecimento, com especial cuidado na zona de transição ($T \approx 108 \text{ K}$) de forma a tirar o número máximo de pontos.

Registámos (V_{amostra} vs $R_{\text{termômetro}}$)

Na subida de temperatura registámos pontos na gama de resistências $R \in [31; 45] \Omega$.

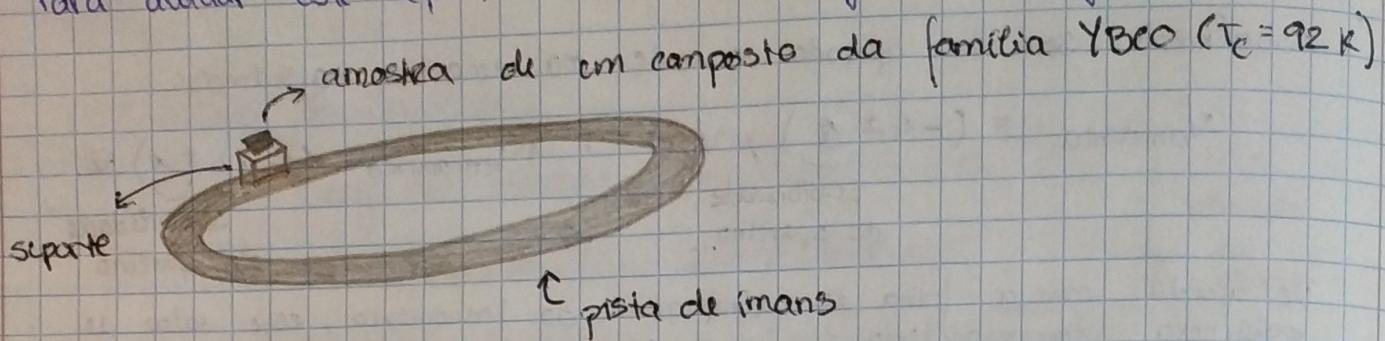
De seguida, baixámos lentamente o valor da corrente da resistência de aquecimento de forma a amelhar o sistema. Tive-se novamente cuidado na zona de transição.

Recolhemos também pontos (V_{amostra} vs $R_{\text{termômetro}}$).

Nota: Na zona de transição gravaram-se vídeos dos aparelhos utilizados de forma a recolher mais pontos e corrigir valores errados. Essas adições e correções encontram-se já incluídos nas análises seguintes.

Ao final da realização desta porção da experiência, realizámos uma prova do Efeito Meissner.

Para avaliar este efeito, utilizámos a seguinte montagem:



Com auxílio do professor vertermos azoto líquido sobre a amostra e esperámos que esta amevesse. De seguida, como auxílio de uma régua e uma régua, removemos o suporte de debaixo da amostra e verificámos que a amostra se mantinha à mesma altura. Quando empurrada, amostra seguia o percurso dos camis e caía quando aquecia, perdendo o regime supercondutor.

Adicionalmente, verificámos que quando o azoto líquido caia sobre uma superfície, a evaporava, criando-se uma região protegida de vapor em redor de uma "bolha" ainda líquida

→ EFEITO DE LEIDENFROST

Verificámos que, independentemente da altura, a amostra mantinha-se fixa à altura a que era ameveda.

Apesar de não terem sido realizadas estas análises deixase como sugestão:

- Estudar como a taxa de aquecimento de amostras de diferentes volumes ~~afeta~~ afeta o tempo que as amostras se mantêm a levitar;
- Experimentar virar a pista ao contrário e verificar se as amostras se mantêm "presas";
- Colocar a amostra a levitar a diferentes alturas e verificar se existe uma altura para a qual o efeito não se verifica;
- Manter a amostra a levitar num ambiente refrigerado (abaixo de T_c) e verificar se elas caem quando a amostra cai.

Breve explicação do Efeito Meissner

Existem 2 tipos de supercondutores:

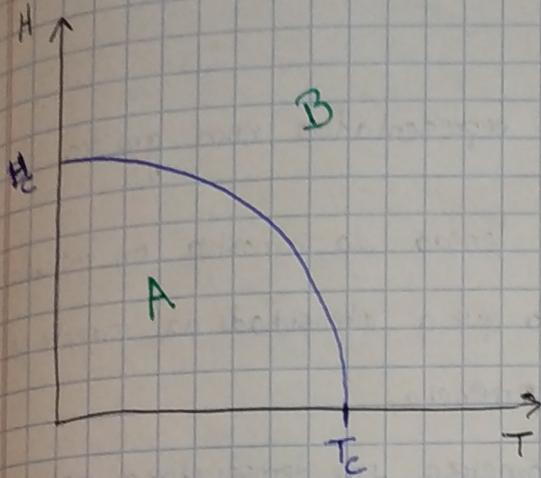
Tipo I

Tipo II

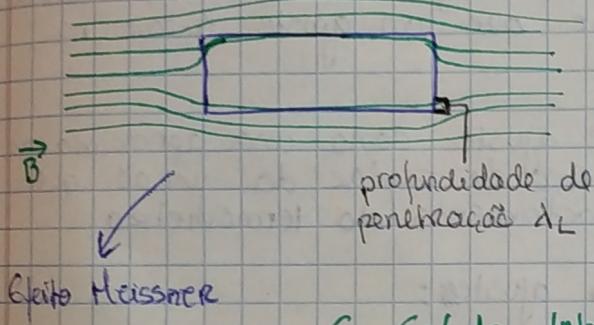
- elementos puros
- T_c baixos (0 a 10 K)
- uma única transição de fase

- compostos complexos
- T_c mais altas
- duas transições de fase

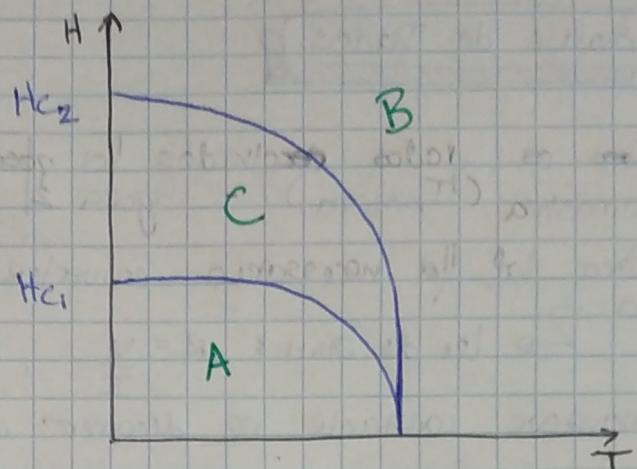
TIPO I



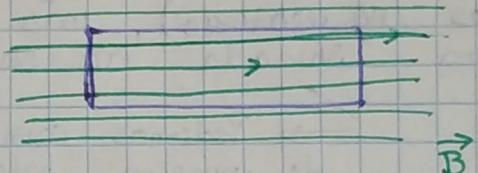
A - Estado Supercondutor



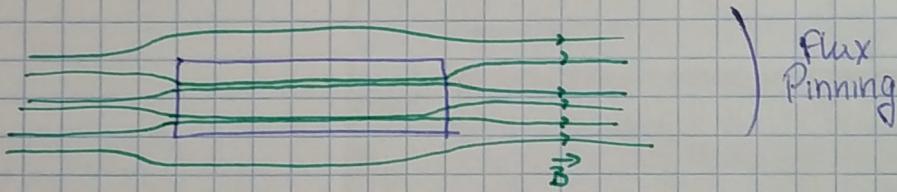
TIPO II



B - Estado Não Supercondutor



C - Estado Intermediário



O efeito Meissner verifica-se na sua totalidade no estado A, que ocorre para supercondutores de Tipo I a campos inferiores ao crítico H_c e para supercondutores de Tipo II para campos inferiores ao campo H_{c1} .

Para supercondutores de Tipo II existe um estado intermediário onde apenas se verifica o efeito de Meissner parcialmente. Originam-se canais de fluxo do campo magnético - **flux pinning** - que "prendem" a amostra no sítio.

Este efeito também pode acontecer em supercondutores do Tipo I se a espessura do material for inferior a $2\Delta_L$.

No atíndade realizada, verificamos o "flux pinning" o que poderá indicar que o campo magnético da Terra se encontra entre os valores de H_{c1} e H_{c2} da amostra estudada.

↑ foram utilizados, nas duas partes da experimentação, supercondutores do tipo II.

Análise de Dados:

Com os dados recolhidos foi possível representá-los num gráfico Ramo-Shtra (T sistema). - figura 2

Para tal faz necessário converter a tensão da amostra em resistência

$$\Rightarrow \text{Lei de Ohm: } R = \frac{V}{I}, \text{ sendo que a intensidade da corrente se}$$

mantém constante no decorrer a experimentação.

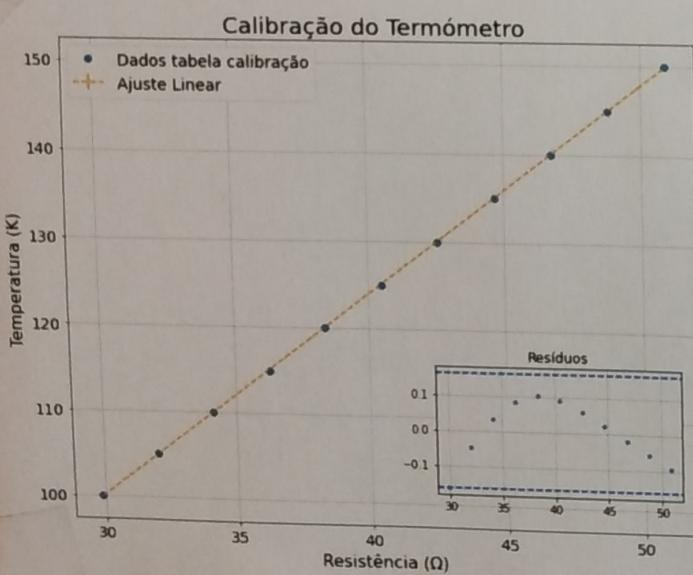
Para converter a resistência do termómetro em temperatura realizar-se um ajuste dos dados presentes na tabela de calibração.

Experimentaram-se efetuar ajustes polinómicos de $4^{\circ}, 3^{\circ}, 2^{\circ}$ e 1° grau na gama $R \in [29,8810; 50,893]$ S2 (encontram-se detalhados no relatório), mas verifica-se que um ajuste linear na gama estudada era satisfatório

→ Podemos considerar este ajuste como uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor da função que melhor modela o comportamento do termómetro

Desta forma, obtivemos o seguinte ajuste:

FIGURA 1



m	2.383	28.6	b
$u(m)$	0.004	0.2	$u(b)$
r^2	0.99997	0.08	$u(y)$

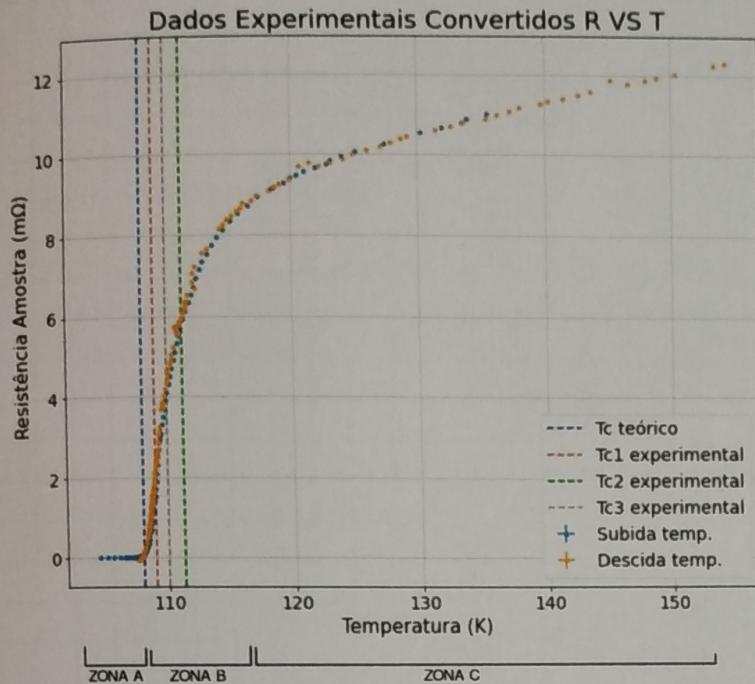
Apesar de se notar um padrão polinomial subjacente, estes são pequenos em módulo ($< 2\text{m}y$) e $r^2 \approx 1$ → Ajuste satisfatório

Com os parâmetros obtidos foi possível converter $R_{\text{termómetro}} \rightarrow T$

$$T = mR + b$$

Tendo a conversão feita, poderam-se representar os dados experimentais - figura 2. Encontram-se também assinaladas a Temperatura crítica da amostra em estudo, assim como a experimental obtida teórica por 3 métodos distintos.

FIGURA 2



Observa-se imediatamente que existe uma variação brusca de temperatura na Zona B onde ocorre a transição para o estado supercondutor. Na Zona A não se deteta resistência - estado supercondutor. Na Zona C a ~~temperatura~~ resistência da amostra aumenta com a temperatura de forma semelhante a um material condutor. Este não é o comportamento que tipicamente se espera de materiais compostos como cerâmicas, que é o caso da amostra estudada.



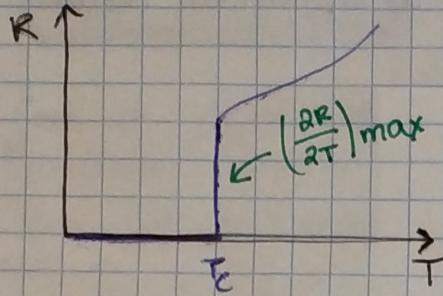
materiais supercondutores (de tipo II) comportam-se como condutores acima da temperatura crítica

Procurar-se determinar a temperatura crítica da amostra por 3 métodos distintos. Estes métodos encontram-se explicitados em detalhe no relatório pelo qual apenas será apresentado aqui o método segundo no protocolo.

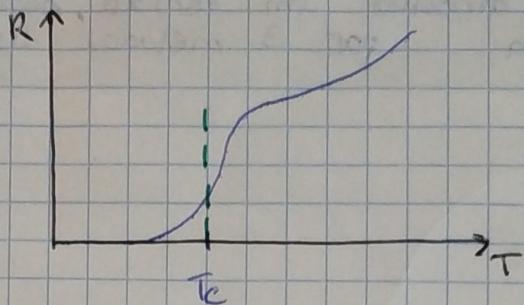
O primeiro método baseia-se na determinação de T_c através da localização do ponto para qual a derivada $\frac{dR}{dT}$ é máxima.

No entanto, com este método apresenta a descida abrupta pressupõe-se que a curva experimental esperada teoricamente.

Curva Teórica



Curva Experimental



Esta discrepância deve-se a vários factores, como a taxa de aquecimento da amostra, a proximidade da amostra à fonte de calor e ao termômetro, a homogeneidade/heterogeneidade estrutural e estreitamente ligada à amostra, defeitos na rede atómica...

↳ Não há garantias que a amostra transite na sua totalidade para o estado supercondutor ~~em simultâneo~~ instantaneamente.

Não há garantias que a temperatura registada pelo termômetro seja aquela a que a amostra efectivamente se encontre.

Os restantes métodos aplicados na análise focaram-se em tentar localizar o ponto médio da curva, aquele para o qual a resistividade da amostra se encontraria no estado supercondutor.

→ Cálculo da Dernada Máxima

Para o cálculo da derivada máxima seguem-se os seguintes passos:

- Cálculo da diferença entre valores adjacentes dos dados experimentais:

$$\Delta R = R_{i+1} - R_i \quad \Delta T = T_{i+1} - T_i$$

- Cálculo da derivada discreta $\Delta R / \Delta T$

- Localização do ponto máximo da derivada

Nas figuras 3a e 3b encontram-se representados as derivadas discrétas dos dados experimentais para a subida e descida de temperatura (o cálculo das incertezas/kamas de erro encontra-se explicado em detalhe no relatório).

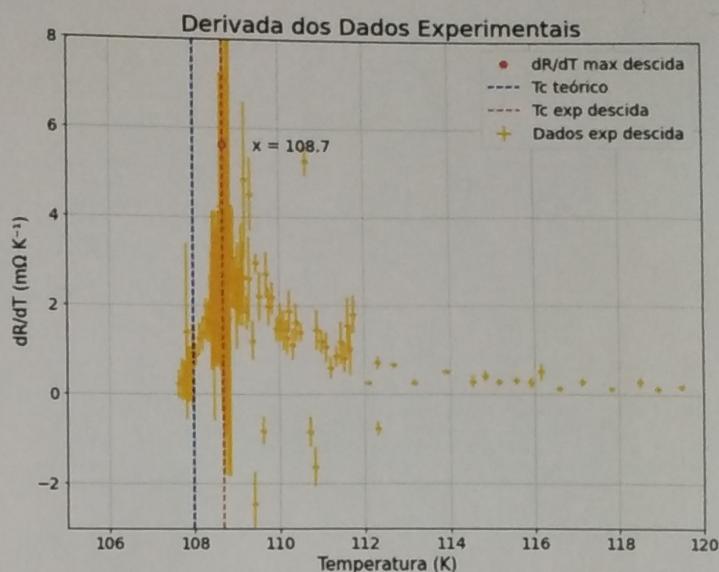
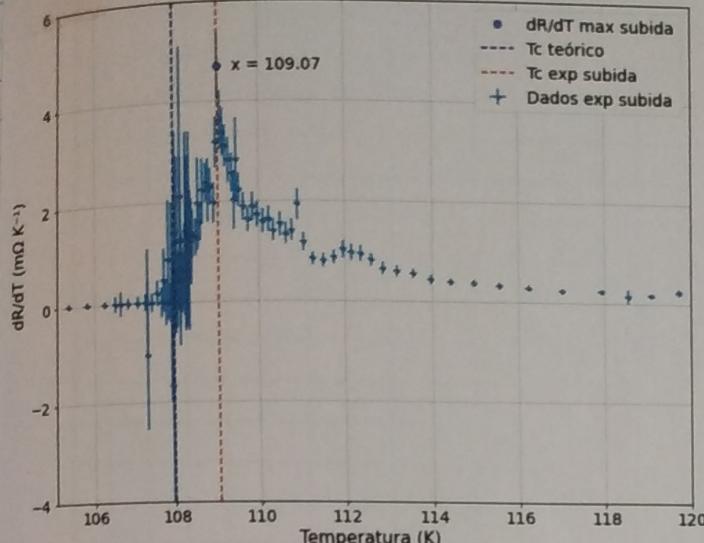
Para determinar a incerteza dos máximos encontrados procura-se interpretar a curva obtida de $(\Delta R / \Delta T) \text{ vs } T$ como uma distribuição probabilística.

Os valores mais elevados de $\Delta R / \Delta T$ indicam que é mais provável esses pontos.

Assim, modelaram-se as curvas, ajustando-as a função de Lorentz.

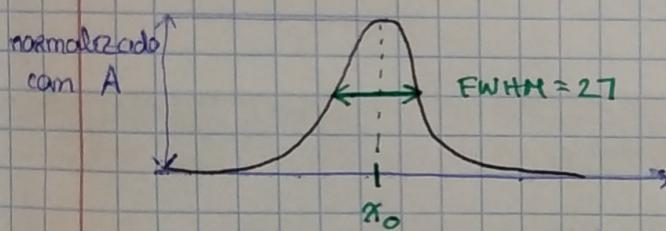
FIGURA 3A e 3B

Derivada dos Dados Experimentais



As funções de Lorentz saem da forma:

$$L(x, x_0, A, \gamma) = A \frac{\gamma^2}{(\gamma^2 + (x - x_0)^2)}$$



Pelo que se for possível ajustar os dados experimentais a uma das curvas, o valor mais provável terá incerteza de FWHM (largura à meia altura) = 27.

Para efectuar estes ajustes utilizar-se o módulo curve-fit da biblioteca SciPy de Python e o método de Monte Carlo para variar os parâmetros tendo em conta a incerteza dos pontos experimentais

↳ método apresentado no moodle da UC pelos docentes

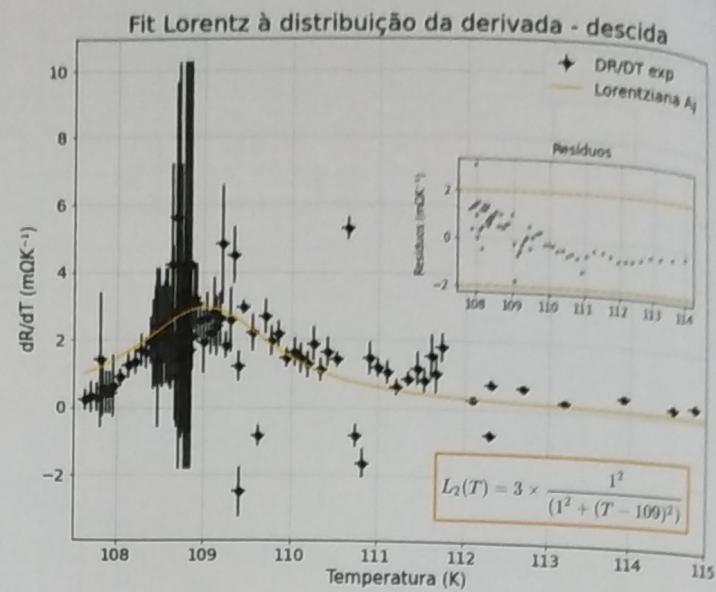
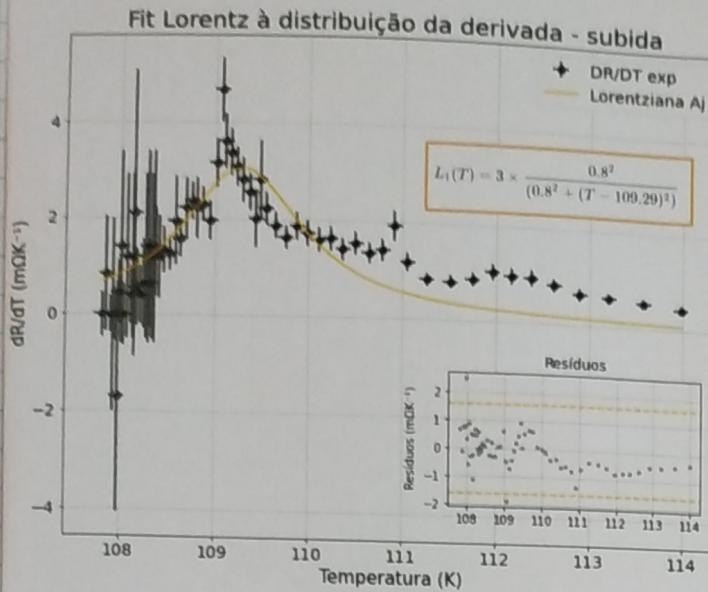
Nas figuras 3a e 3b encontram-se representados os ajustes realizados. A modelação dos dados ao ajuste não é muito satisfatória.

- r^2 de 0,6 ± 0,3
- qualitativamente, a curva não se ajusta aos dados

⇒ Seria interessante numa análise futura tentar modelar os dados à convolução de várias curvas de distribuição.

Para o resto deste trabalho os resultados foram aceitáveis e pode-se atribuir um valor de incerteza às derivadas máximas calculadas.

FIGURA 4A e 4B



PARÂMETROS DE AJUSTE

-	Subida	Descida
A	(3.0 ± 0.3)	(3.0 ± 0.8)
Γ	(0.8 ± 0.2)	(1.0 ± 0.4)
x_0	(109.29 ± 0.07)	(109.0 ± 0.2)
FWHM	(1.6 ± 0.2)	(1.8 ± 0.3)
r^2	0.6	0.3

Desta forma, obtivemos:

$$T_{c\text{ subida}} = (109,1 \pm 1,6) \text{ K com erro de } 1\%.$$

$$T_{c\text{ descida}} = (108,9 \pm 1,8) \text{ K com erro de } 0,8\%.$$

$$\langle T_c \rangle = (109 \pm 1) \text{ K com erro de } 1\%.$$

↳ média ponderada

Para os restantes métodos, estes baseiam-se na intersecção de ~~linhas~~ retas interpoladas e de ajustes lineares em diferentes zonas da gama experimental. A altura média da semireta vertical (método 2) é a altura média da reta de ajuste dado-nos a ordenada dos pontos experimentais para os quais a abscissa é a temperatura média de transição. (mais detalhes no relatório).

Assim sendo obtém-se:

$$\langle T_{c2} \rangle = (111,30 \pm 0,06) \text{ K com erro de } 3\%.$$

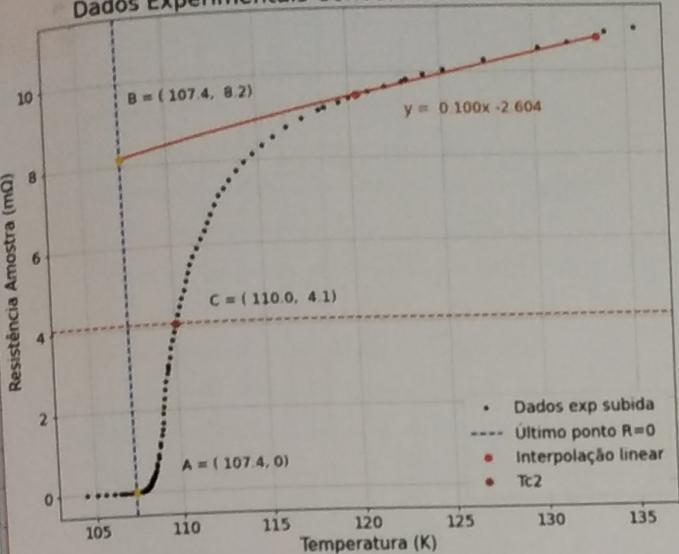
$$\langle T_{c3} \rangle = (110 \pm 3) \text{ K com erro de } 2\%.$$

Referências

Nota: Os detalhes de incertezas, propagação, fórmulas e outras ~~grafos~~ gráficas cálculos omitidos encontram-se presentes no relatório disponível na drive partilhada - QR Code

FIGURA 5A e 5B

Dados Experimentais Convertidos R VS T Subida



Dados Experimentais Convertidos R VS T Descida

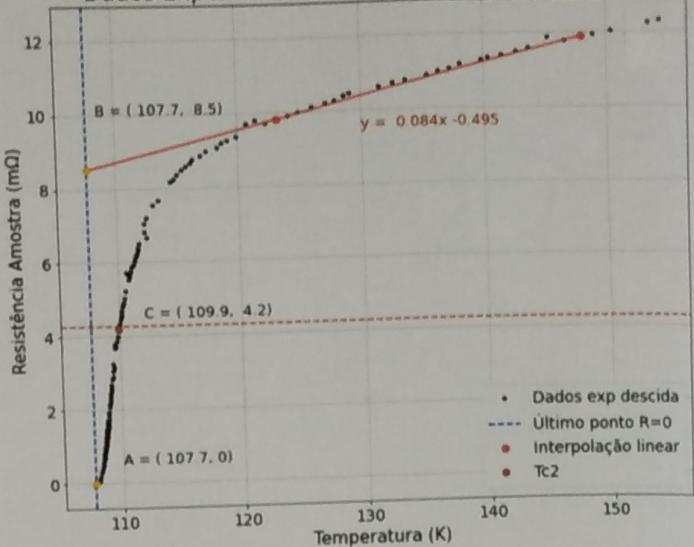
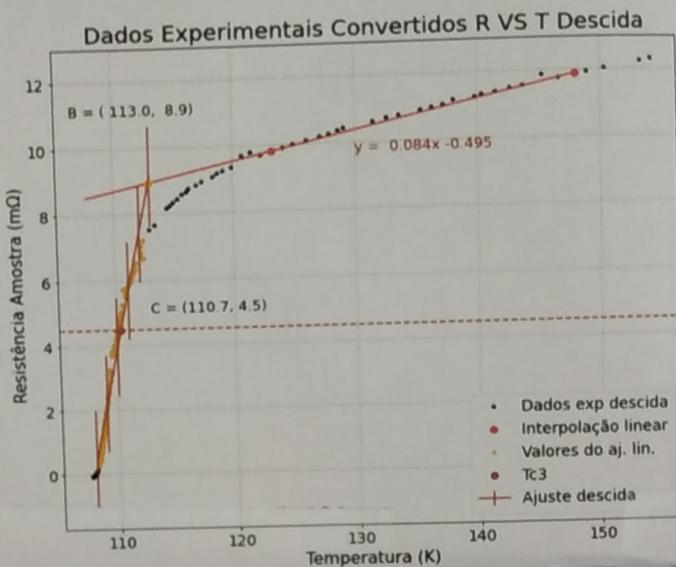
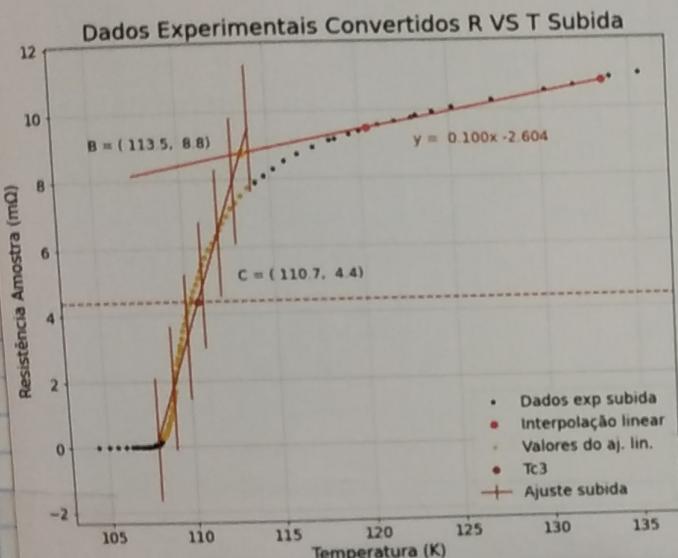


FIGURA 6A e 6B



Conclusões:

- Verificou-se o Efeito de Meissner parcial (flux pinning) numa amostra de YBCO através do aquecimento da mesma sobre uma pista de manganos.
- Verificou-se experimentalmente, utilizando o método dos 4 contactos, o regime supercondutor de uma amostra de Bi₂Pb₂Sr₂Ca₂O₇, tendo-se observado que, quando aquecida abaixo de 110K a sua resistência desaparecia.
- Verificou-se a variação brusca da resistência na gama de temperaturas [108, 112] K tendo calculado a Te experimental como $T_c = (109 \pm 1) K$ com erro de 1% tendo em conta o valor de referência de 108 K.
- Estimou-se a temperatura para a qual cerca de metade da amostra já se encontra no estado Supercondutor:
 - $T_{c2} = (111,30 \pm 0,06) K$ diferindo em 3% de T_c teórica/ref
 - $T_{c3} = (110 \pm 3) K$ diferindo em 2% de T_c referência