

SILVIO ROBERTO DE AZEVEDO SALINAS

ENSAIOS COM UMA BOBINA
SUPERCONDUTORA

SBI-IFUSP



305M810T3003



Tese apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de "Mestre em Ciências".



São Paulo, dezembro, 1968

AGRADECIMENTOS

Desejamos expressar os nossos agradecimentos aos companheiros, técnicos e pesquisadores, vinculados ao Grupo de Física do Estado Sólido, sem o apoio dos quais teria sido impossível a realização deste trabalho.

Agradecemos também a orientação e as muitas discussões com o Prof. Nei F. Oliveira Jr., e o apoio decidido dos Profs. Carlos Quadros e Luiz G. Ferreira.

Somos gratos ao "Centre de Recherches sur les très Basses Températures", de Grénoble, que nos enviou a bobina supercondutora, e ao auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq).

INDICE

I	- Introdução	1
II	- Adaptação da bobina a um criostato de vidro. Cálculos criogênicos	3
II.1	- Características da bobina	3
II.2	- Dificuldades da adaptação. Solução encontrada	4
II.3	- Projeto da adaptação. Cálculos	4
III	- Levantamento do campo magnético produzido pela bobina	9
III.1	- Método de medida utilizado. Montagem da experiência	9
III.2	- Projeto da bobina de prova e da tampa do criostato	10
III.3	- Resultados experimentais	12
	a) teste da bobina de prova	12
	b) desempenho geral da bobina supercondutora.	
	Gasto de N ₂ e He ⁴ líquido	12
	c) medidas do campo magnético	14
IV	- Medidas da magneto-resistência longitudinal de uma resistência de carvão	21
IV.1	- Considerações teóricas	21
IV.2	- Resultados experimentais	23
	a) características da amostra utilizada	23
	b) montagem experimental	23
	c) considerações sobre as medidas efetuadas	24
V	- Conclusões	31
VI	- Referências bibliográficas	32
Apêndice I		33
Apêndice II		36
Apêndice III		38
Apêndice IV		40

A supercondutividade foi descoberta em 1911 por Kamerlingh-Onnes, divisando-se desde então a possibilidade de construir eletroímãs que gerassem campos extremamente altos com gastos reduzidos de energia. No entanto, somente há pouco tempo, a partir de 1961, é que foram descobertos os chamados supercondutores "duros" que suportam altos campos magnéticos e com os quais se construíram as primeiras bobinas supercondutoras produzindo campos de até 15 KGauss. Atualmente já se ultrapassou a marca dos 100 KG com ligas de Nb-Zr, Nb-Ti, e com Nb_3Sn .^{1,2}

São evidentes as vantagens de tais bobinas: muito menor dispêndio de energia, tamanho reduzido, baixo preço. No momento elas têm sido amplamente empregadas em vários tipos de experiências relacionadas com a física do Estado Sólido; a sua utilização industrial ainda está limitada pelas pobres características de funcionamento em regime alternado e pelas limitações de corrente que impedem a produção de campos mais altos.

A bobina com que trabalhamos foi-nos cedida pelo "Centre de Recherches Sur les Très Basses Températures" (CRSBT) de Gréno-ble e o interêsse básico dêste trabalho prende-se à sua adaptação a um criostato e à verificação das características de seu funcionamento. O importante era adquirir uma certa prática e os conhecimentos necessários para trabalhar com uma outra bobina supercondutora, de maiores proporções, que o Laboratório deverá adquirir próximamente.

No Capítulo I descrevemos a adaptação da bobina a um criostato de vidro comum em nosso Laboratório. É interessante notar que embora ultimamente tenham saído muitos artigos sobre bobinas supercondutoras praticamente nada se encontra no que se refere à sua adaptação a criostatos ou ao gasto de He^4 líquido. Como apêndice ao capítulo I encontram-se os cálculos criogênicos por nós efetuados.

No Capítulo II descrevemos o funcionamento da bobina, o método escolhido para a medida do campo magnético e de sua uniformidade ao longo do eixo, e apresentamos os resultados obtidos. Como não estávamos interessados em obter grande precisão nas medidas utilizamos um fluxômetro dotado de uma bobina de prova que, através de uma carretilha, poderia ser deslocada ao longo do eixo da bobina supercondutora.

No Capítulo III descrevemos e damos os resultados de uma experiência para a medida da magneto-resistência longitudinal de uma resistência de carvão. Esta é uma das experiências que podem ser realizadas facilmente com o auxílio da bobina supercondutora. Os seus resultados eram particularmente importantes porque esta resistência vem sendo calibrada em nosso Laboratório para medir temperaturas entre $0,3^{\circ}\text{K}$ e 20°K .

II - ADAPTAÇÃO DA BOBINA A UM CRIOSTATO DE VIDRO.

CÁLCULOS CRIOGÊNICOS.

II.1 - Características da bobina:

A bobina supercondutora nos foi enviada com as seguintes especificações:

a) possui uma região central com campo uniforme da ordem de 900 Gauss/Ampère, variando linearmente com a corrente aplicada;

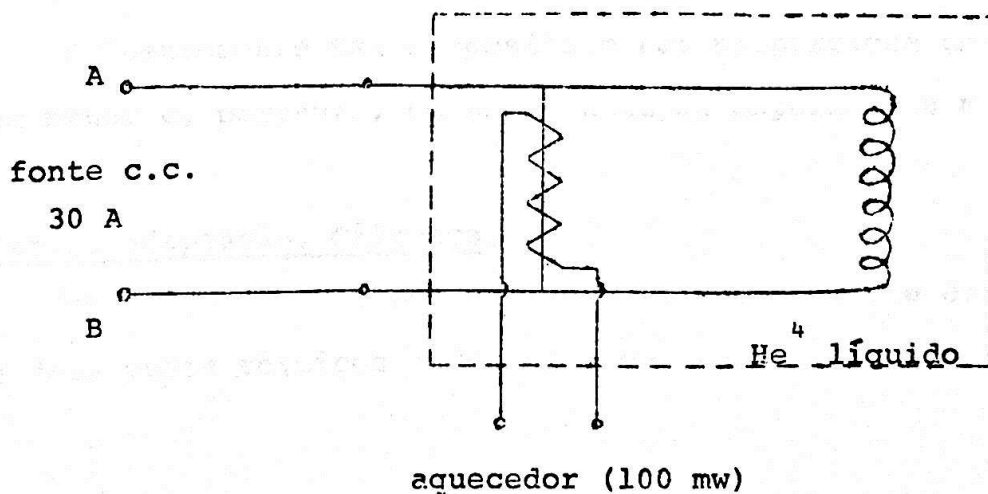
b) a sua corrente crítica (que define o campo máximo) é da ordem de 25 A;

c) deve ser alimentada por uma fonte de corrente contínua que dê 4 V de tensão na saída e uma corrente que possa ser aumentada lentamente (até 30 A). A fonte deve ser estabilizada;

d) para eventuais ensaios à temperatura ambiente ou à do N_2 líquido não lhe deve ser entregue mais do que 1 watt de potência;

e) para ligar o interruptor deve-se dissipar aproximadamente 100 mw.

Tal bobina pode ser representada pelo seguinte circuito esquemático:



A bobina é dotada de um curto-circuito de material supercondutor que permanece mergulhado no He⁴ líquido. Para injetar corrente na bobina é preciso desfazer tal curto-circuito — consegue-se isto ligando-se o aquecedor (interruptor), constituído por um fio de manganina enrolado ao curto supercondutor, e aguardando-se alguns segundos.

O formato da bobina é o de um cilindro ôco com diâmetro externo de 5,56 cm, diâmetro interno de 3,06 cm e altura de 13,9 cm.

II.2.- Dificuldades da adaptação. Solução encontrada.

A grande dificuldade é o gasto de He⁴ líquido. Para produzir campos elevados a bobina deve ser alimentada por altas correntes ($I_{\text{crítico}} = 25 \text{ A}$). Devemos então usar fios grossos de cobre para evitar uma dissipação excessiva de calor por efeito Joule. Entretanto, tais fios são também excelentes condutores térmicos e seria muito grande a entrada de calor através deles entre a tampa do criostato a 300°K e banho a 4°K.

Resolvemos então, por sugestão do trabalho de G. T. Meaden e P. Pelloux-Gervais,³ introduzir uma caneca de latão contendo N₂ líquido entre a tampa do criostato e o banho de He⁴ líquido. Tal caneca funcionaria como um reservatório térmico a 80°K, absorveria parte da potência Joule dissipada e faria com que o gradiente de temperatura entre os fios e o banho fôsse reduzido a aproximadamente 75°K.

Evidentemente tal dispositivo nos proporciona uma perda de He⁴ bem menor e, portanto, um tempo útil de experiência muito maior.

II.3 - Projeto da adaptação. Cálculos.

Utilizamos um criostato de vidro que consiste essencialmente de dois tubos térmicos ("dewars") de "pyrex". Entre os dois

tubos coloca-se N_2 líquido com cêrca de 10 horas de antecedência visando o resfriamento do espaço experimental do tubo interno, inicialmente cheio de He^4 gás e que depois conterá o He^4 líquido. Utilizamos os "dewars" de maior comprimento existentes em nosso Laboratório (130 cm) e cujo diâmetro da secção interna utilizável é de 6,5 cm.

A caneca, inteiramente constituída de latão, deveria estar posicionada na região do criostato situada entre o nível externo máximo de N_2 líquido e o nível interno em que o He^4 gás estaria no entôrno de $80^\circ K$. A sua sustentação era realizada através de três tubos de alpaca: dois dêles serviam para a entrada do N_2 líquido e o terceiro atravessava completamente a caneca servindo como guia para o sifão transferidor de He^4 líquido. Um dos fios de cobre passava por dentro da caneca em contacto direto com o N_2 líquido, atravessando as paredes por meio de isoladores "stupakoffs" à prova de vácuo, e o outro era substituído pela sua própria carcassa.

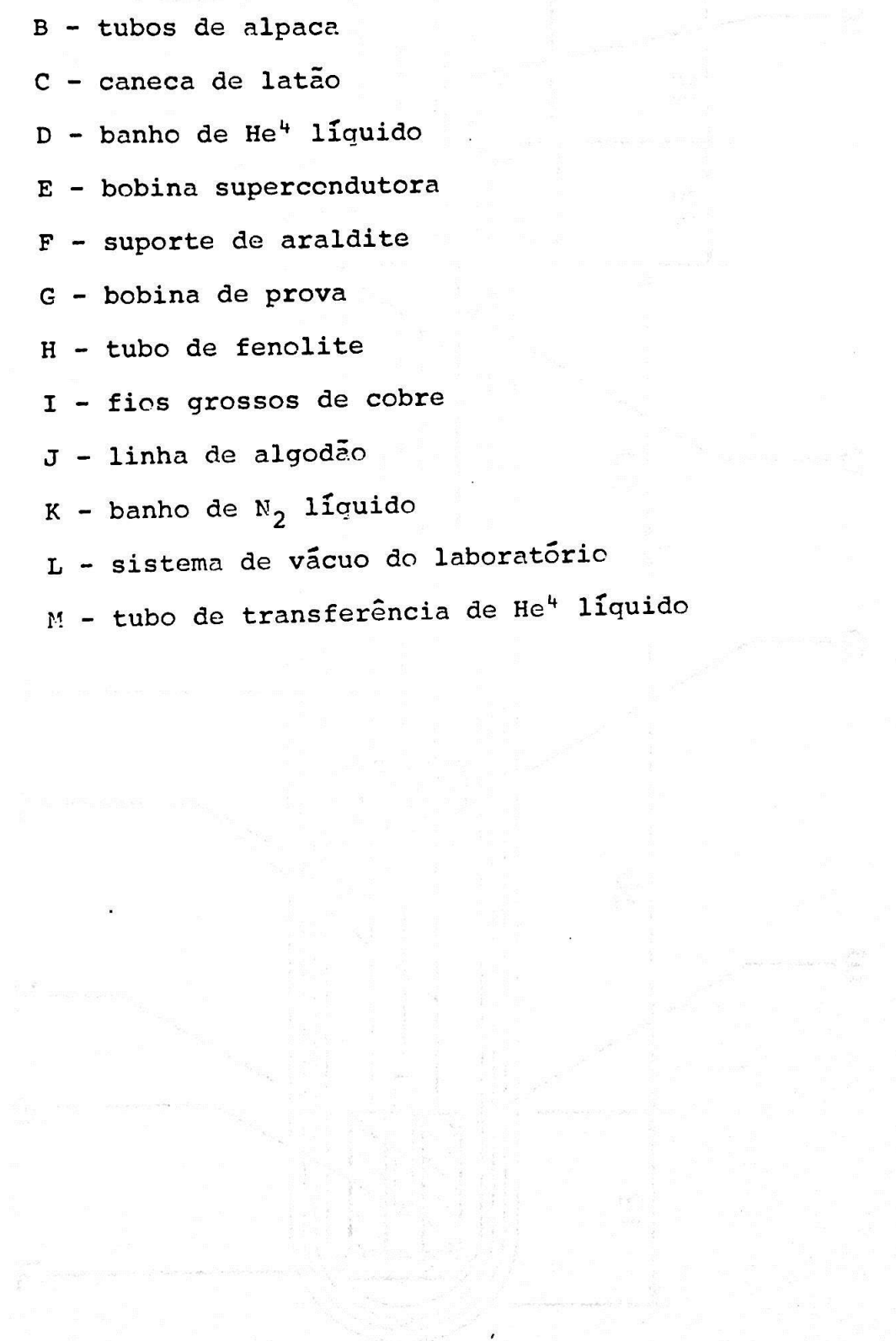
Pelo nosso projeto a caneca se situava com o seu bordo superior 30 cm abaixo da tampa do criostato, posição esta que deveria aproximadamente coincidir com o nível externo de N_2 líquido. Era constituída por duas cascas cilíndricas de mesmo eixo, com espessura reduzida (aproximadamente 3 mm) e uma altura total de 30 cm. O projeto foi feito de tal forma que a sua secção fôsse uma corôa circular com diâmetro interno de 3,0 cm para que pudesse ser aproveitado integralmente o espaço interior à bobina supercondutora: sem desmontar a adaptação poderíamos introduzir na bobina montagens experimentais diversas com diâmetros de até 3,0 cm. O diâmetro externo da corôa, 6,2 cm, foi projetado de maneira que a caneca entrasse com facilidade no "dewar". A altura de 30 cm foi calculada tendo em vista que a base inferior da caneca deveria ficar sempre acima do He^4 líquido e numa região de temperatura em que normalmente o He^4 gás estivesse não muito abaixo de $80^\circ K$. Evidentemente não só no ini-

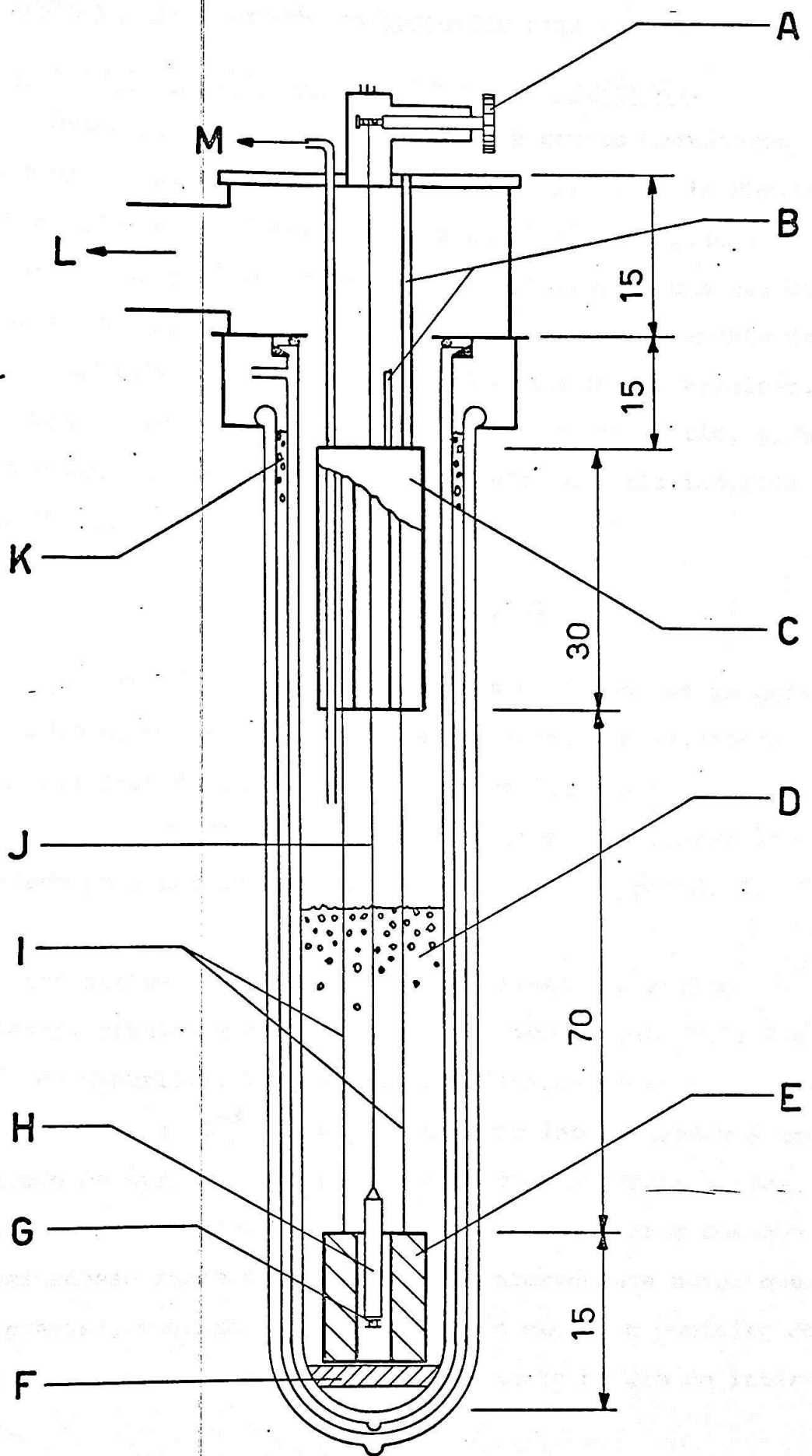
cio mas também no transcorrer da experiência o vapor frio de He⁴ deveria concorrer para resfriá-la bastante; isto se verifica porque há uma evaporação contínua de He⁴ líquido e o calor específico de He⁴ gás é cerca de 80 vezes superior ao do He⁴ líquido. Calculando as transferências de calor através dos fios com a caneca sempre a 77°K, considerando uma dissipação interna por efeito Joule devido a uma corrente de 30 A, e não levando em conta o efeito dos vapores frios de He⁴, concluímos que o N₂ líquido permaneceria dentro da caneca durante mais de duas horas, tempo suficiente para a realização das experiências planejadas. Os vapores frios de He⁴ apenas contribuiriam para aumentar o tempo útil das experiências e o seu cálculo apresentaria alguma dificuldade no que tange ao estabelecimento da superfície total de contacto da caneca.

Considerando as entradas de calor no banho de He⁴ por condução e por efeito Joule calculamos o valor ótimo para o diâmetro dos fios de cobre: 0,87 mm. Usamos então fios de 1 mm de diâmetro. Com tais condutores e nas condições de maior dissipação Joule (corrente ininterrupta de 30 A) calculamos que o nível de He⁴ líquido no criostato deveria baixar à razão de 35 cm/hora. Tal valor foi considerado satisfatório para a realização de vários tipos de pequenas experiências, entre outras as de magneto-resistência ou de efeito de Haas-Shubnikov. Os cálculos criogênicos baseiam-se em G. K. White¹ e Hoare, Jackson, Kurti⁴ e estão expostos nos apêndices I e II.

FIGURA 1 - Desenho esquemático da adaptação da bobina ao criostato de vidro

- A - carretilha
- B - tubos de alpaca
- C - caneca de latão
- D - banho de He⁴ líquido
- E - bobina supercondutora
- F - suporte de araldite
- G - bobina de prova
- H - tubo de fenolite
- I - fios grossos de cobre
- J - linha de algodão
- K - banho de N₂ líquido
- L - sistema de vácuo do laboratório
- M - tubo de transferência de He⁴ líquido





dimensões em cm

III - LEVANTAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO PELA BOBINA.

III.1 - Método de medida utilizado. Montagem da experiência.

Vários processos para a medida de campos magnéticos foram descritos por J. L. Symonds⁵ no "Reports on Progress in Physics". Selecionamos o método do fluxômetro por sua simplicidade, pelo fato de já possuímos no laboratório um aparelho deste tipo, e uma vez que nosso interesse no momento se prendia muito mais ao funcionamento da bobina e do criostato do que a medidas do campo com grande precisão.

Uma pequena bobina de prova com N voltas de fio, situada num campo magnético \vec{B} , apresenta uma força eletromotriz induzida v, dada pela relação:

$$v = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int N \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

O fluxômetro é essencialmente constituído por um galvanômetro de quadro móvel, de baixo torque restaurador e altamente amortecido, que nos fornece uma indicação proporcional à integral de v e, portanto, ao valor do fluxo do campo magnético. Uma discussão mais pormenorizada pode ser obtida num artigo publicado por H. K. Dunn.⁶

Utilizamos em nossas medidas de fluxo o aparelho "Scalamp Fluxmeter, catalogue number 8334", fabricado pela "W.G. Pye and Co. Ltda.", de Cambridge, Inglaterra. Tal fluxômetro apresenta um fundo de escala de $7,00 \times 10^{-3}$ weber. O seu maior inconveniente é uma ligeira velocidade de arrastamento do ponteiro do mostrador: muitas vezes, mesmo pelo repetido ajuste do zero, era difícil fazer com que o ponteiro permanecesse quase estacionário. É interessante notar que uma indicação precisa, segundo Dunn, só se obtém quando o ponteiro do fluxômetro estiver em repouso tanto no começo quanto no fim do intervalo de medida.

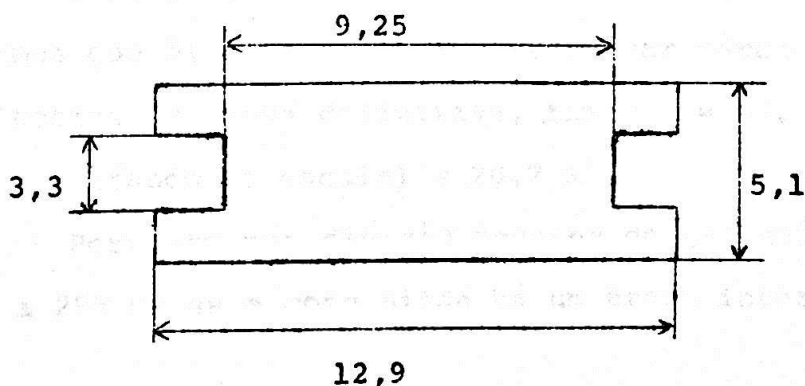
As características da bobina de prova devem ser fixa-

das tendo em vista o fundo de escala do aparelho, o campo máximo a ser medido e a montagem experimental que se tenha em vista. O fluxômetro que utilizamos já vinha acompanhado por algumas bobinas que no entanto se mostraram inadequadas para o tipo de medida que pretendíamos fazer.

Após selecionada a bobina de prova conveniente a montagem da experiência está praticamente acertada. A tampa do criostato deverá possuir 4 "stupakoffs" laterais: dois deles para os fios grossos de cobre da bobina supercondutora que são ligados à fonte de alimentação estabilizada, e os outros dois ligados a uma pequena fonte de tensão contínua que fornece a energia necessária para ser dissipada no aquecedor do curto-circuito supercondutor. A região central da tampa possui mais quatro "stupakoffs" pequenos, dois dos quais servem para conectar os fios da bobina de prova aos terminais do fluxômetro. As medidas de corrente foram efetuadas com um miliamperímetro e um "shunt" variável tipo Weston, modelo 1, nº 65559, fabricado pela "Daystrom, Incorporated", fornecendo um erro de 0,5% no fundo de escala.

III.2 - Projeto da bobina de prova e da tampa do criostato.

A bobina de prova que usamos nas experiências definitivas era constituída por um núcleo de lucite, com o formato de um carretel achatado, em torno do qual se enrolavam N voltas de fio de cobre nº 38. O conjunto era espartado com verniz G.E. nº 7031 e os fios de conexão com a tampa do criostato foram devidamente trançados. Esquemáticamente tínhamos (dimensões em milímetros):



diâmetro médio (considerando a espessura do enrolamento):

$$D = (10,4 \pm 0,05) \text{ mm}$$

Tal diâmetro foi escolhido tendo em vista a área das secções de possíveis amostras cujo comportamento sob a ação do campo magnético poderia apresentar futuro interêsse de estudo.

Esta bobina foi colada com fita adesiva à base inferior de um cilindro ôco de fenolite de tal forma que se situasse paralelamente à sua secção reta. Este cilindro deveria servir como suporte para a bobina e era prêsso por uma linha de algodão à cabeça do criostato. A sua altura era de cêrca de 20 cm e a secção possuía um diâmetro de 2,8 cm, de maneira que êle podia entrar sem muita folga na bobina supercondutora. Um ajuste dêste tipo nos garantiria que a bobina de prova sempre estivesse colocada com o seu centro sôbre o eixo da bobina supercondutora (com um desvio de 2 mm) e também com a sua secção ortogonal a êste eixo (desvio de 1°). Assim o fluxo do campo magnético seria dado simplesmente por:

$$\phi = B.A.$$

onde

B = campo produzido

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

O campo correspondente ao fundo de escala do fluxômetro será dado por:

$$\phi = B.A.N = 7,00 \times 10^{-3} \text{ weber}$$

Como já tínhamos feito uma exploração preliminar do campo e sabíamos que êle não deveria ultrapassar cêrca de 21 KG resolvemos, na bobina de prova definitiva, tomar $N = 40$. Então temos:

$$B(\text{fundo de escala}) = 20,7 \text{ KG}$$

Portanto uma divisão pequena do galvanômetro deverá corresponder a 295 Gauss e como ainda há um traço intermediário a lei

tura estará sujeita a um desvio de aproximadamente 75 Gauss.

Para medir o campo ao longo do eixo da bobina supercondutora projetamos a tampa do criostato de tal forma que comportasse uma carretilha à qual estava amarrada a linha de algodão que sustentava o tubo de fenolite com a bobina de prova na sua base inferior. O desenho esquemático desta carretilha com o seu eixo vedado por dois "o'rings" encontra-se exposto na figura 1. Aliás tãda a tampa do criostato mereceu um projeto cuidadoso para que se pudessem fixar as conexões elétricas e para que não houvesse problema na introdução do transferidor de He⁴ líquido. Com o sifão que tínhamos no Laboratório não conseguimos transferir He⁴ dentro do nosso criostato: foi necessário construir um outro sifão transferidor que fôsse suficientemente comprido para atravessar tãda a caneca e lançar o He⁴ mais embaixo, colocando-o primeiramente em contacto com o reservatório térmico inferior (a própria bobina).

III.3 - Resultados experimentais.

a) teste da bobina de prova

Visando a verificação do sistema medidor com a bobina de prova por nós fabricada efetuamos algumas medidas à temperatura ambiente do campo magnético produzido pelo eletro-ímã "Varian" modelo V-4012 A, existente em nosso Laboratório. Tal campo é controlado por um sistema baseado no efeito Hall (equipamento "field-dial" da "Varian") que nos dá medidas com um desvio de apenas .5 Gauss. Com o fluxômetro muito bem zerado, sem velocidade de arrastamento, as suas indicações, dentro do desvio previsto, coincidiram com as indicações do mostrador do "field-dial". Este teste nos indicou o bom funcionamento da bobina de 40 voltas, depois que tivemos a precaução de trançar convenientemente os seus fios de conexão com o fluxômetro.

b) desempenho geral da bobina supercondutora. Gasto de N₂ e He⁴ líquido

Em tãdas as experiências que fizemos a bobina sempre

funcionou dentro das expectativas. Com o aquecedor ligado (sempre se dissipou nêle pouco mais de 100 mw) o curto-circuito se desfazia e passava a surgir um campo magnético proporcional à corrente. Notamos inclusive que se desligássemos o aquecedor e em seguida também a corrente o ponteiro do fluxômetro não se mexia indicando que o campo magnético permaneceria constante indefinidamente.

De uma feita chegamos a ultrapassar durante poucos segundos a corrente crítica ($I = 25 \text{ A}$) da bobina. O material deve realmente ter saído do estado supercondutor pois o gasto do He^4 líquido foi violento: o seu nível baixou rapidamente de uns 5 a 10 cm. Este procedimento é perigoso pois muito He^4 líquido se evapora quase instantaneamente, e a válvula de saída dos condutores de He^4 gás pode não dar vazão suficiente. Ocorre então um acúmulo de vapor dentro do criostato, aumenta a pressão, e o perigo de uma explosão se torna iminente. Por precaução depois disto só fizemos medidas até uma corrente máxima de 22 A.

Apenas um fato nos preocupou desde as primeiras experiências — a bobina nunca conseguiu dar o campo magnético previsto (900 G/A). A região de campo máximo que obtivemos dava apenas aproximadamente 750 G/A. Atribuimos isto a um engano nas especificações ou a algum erro de construção: todavia não abrimos a bobina pois os materiais supercondutores em geral são muito quebradiços e temíamos inutilizá-la.

O N_2 líquido realmente se manteve na caneca durante todo o transcorrer das experiências; nunca precisamos transferir novamente N_2 líquido. Não houve nenhum resfriamento exagerado da tampa do criostato e as ligações elétricas jamais apresentaram problema.

O He^4 líquido, como se esperava, não apresentou um gasto tão grande quanto o calculado, uma vez que o cálculo foi feito em condições exageradamente desfavoráveis. O nível de He^4 líquido

baixou apenas à razão média de 15 cm/hora.

c) Medidas do campo magnético

Realizamos várias medidas de fluxo do campo magnético em função da corrente elétrica em diversas posições do eixo da bobina. Dividimos tal eixo, a partir da base inferior, em dez posições correspondentes ao número de voltas da carretilha, para efeitos de identificação conforme o registro do gráfico da figura nº 2. Uma volta completa correspondia a aproximadamente 1 cm e as dez posições cobriam inteiramente a altura da bobina. É interessante notar que a bobina, apesar de ter 13,9 cm de carcassa, correspondia tão somente aos 10 cm inferiores, pois o restante era constituído por um bloco de material plástico onde se encontram dois pequenos tarugos de cobre que são conectados aos fios grossos condutores da corrente. Obtivemos assim uma indicação a respeito da variação do campo ao longo do eixo.

A figura 2 nos apresenta um gráfico típico. Os pontos superiores dão uma indicação imprecisa pois são tomados a favor da velocidade de arrastamento do ponteiro do fluxômetro. Nestas experiências sempre foi difícil ajustar o zero do aparelho; com frequência o arrastamento retornava e nós resolvemos realizar medidas movimentando o ponteiro no sentido contrário ao da velocidade de arrastamento. Conseguimos então obter dados mais precisos, dentro das possibilidades do aparelho, embora introduzindo um erro sistemático que deveria diminuir os valores esperados. Os pontos inferiores da figura 2 são obtidos desta forma e já nos dão uma boa indicação. Realizamos medidas para a verificação da uniformidade do campo para vários valores da corrente: os dados obtidos para correntes de 5,0 A; 10,0 A; 15,0 A e 20,0 A encontram-se no apêndice III.

A figura 3 nos apresenta duas retas típicas de corrente "versus" fluxo. Uma para a região de campos não uniformes e baixos (reta inferior) obtida com contínuos ajustes do zero, tentando sempre

diminuir a velocidade de arrastamento (entre a posição 0 e a posição 1 - do gráfico 2). A outra para o início da região de campos uniformes e altos (posição 3 - do gráfico 2) obtido com medidas contrárias à velocidade de arrastamento.

Obtivemos vários conjuntos de dados (fluxo de campo magnético "versus" corrente elétrica) para a região dos campos uniformes, sempre com medidas contrárias à velocidade de arrastamento. Em seguida obtivemos as melhores retas por ajuste segundo o método dos desvios quadráticos mínimos; como tôdas estas retas deveriam passar pela origem (quando não há corrente também não deve haver campo na bobina) temos imediatamente o valor do erro sistemático devido ao arrastamento conhecendo os coeficientes lineares das várias equações de retas obtidas. No apêndice III temos os dados para as posições 3, 4, 4,5, 5,5 da figura 2; o programa para o cálculo dos coeficientes das melhores retas ajustáveis, e os resultados obtidos com os seus respectivos desvios.

Sendo y a marcação do fluxômetro ($w \times 10^{-3}$) e x a marcação do amperímetro (A) obtivemos:

$$y = a + bx$$

<u>posição</u>	<u>a</u>	<u>b</u>
5,5	- (0,14 ± 0,02)	0,254 ± 0,001
5	- (0,20 ± 0,01)	0,2558 ± 0,0009
4,5	- (0,24 ± 0,02)	0,255 ± 0,001
4	- (0,13 ± 0,01)	0,253 ± 0,001
3	- (0,155 ± 0,007)	0,2506 ± 0,0005

O valor de b (com a precisão de aproximadamente 0,5%) nos fornece uma indicação sobre a uniformidade do campo (dentro da imprecisão da medida na região entre as posições 4 e 5 da figura 2). Consideramos tais medidas uma avaliação bastante razoável do desem-

penho da bobina supercondutora. Em termos de campo magnético teríamos (na região entre 4 e 5):

$$B(\text{KG}) = 0,755 I (\text{A})$$

onde o fator de conversão 0,755 KG/A vem afetado de um desvio de 1%.

FIGURA 2 - Campo magnético ao longo do eixo da bobina para uma corrente de 10,0 A. O eixo "POSIÇÃO" discrimina as várias posições, a partir do bordo inferior, sobre o eixo da bobina supercondutora (cada divisão corresponde a pouco mais de 1 cm).

CAMPO (KG)
DIVISÕES (WEBERX10³)

440 200

592 200

444 150

296 100

I = 10,0 A

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

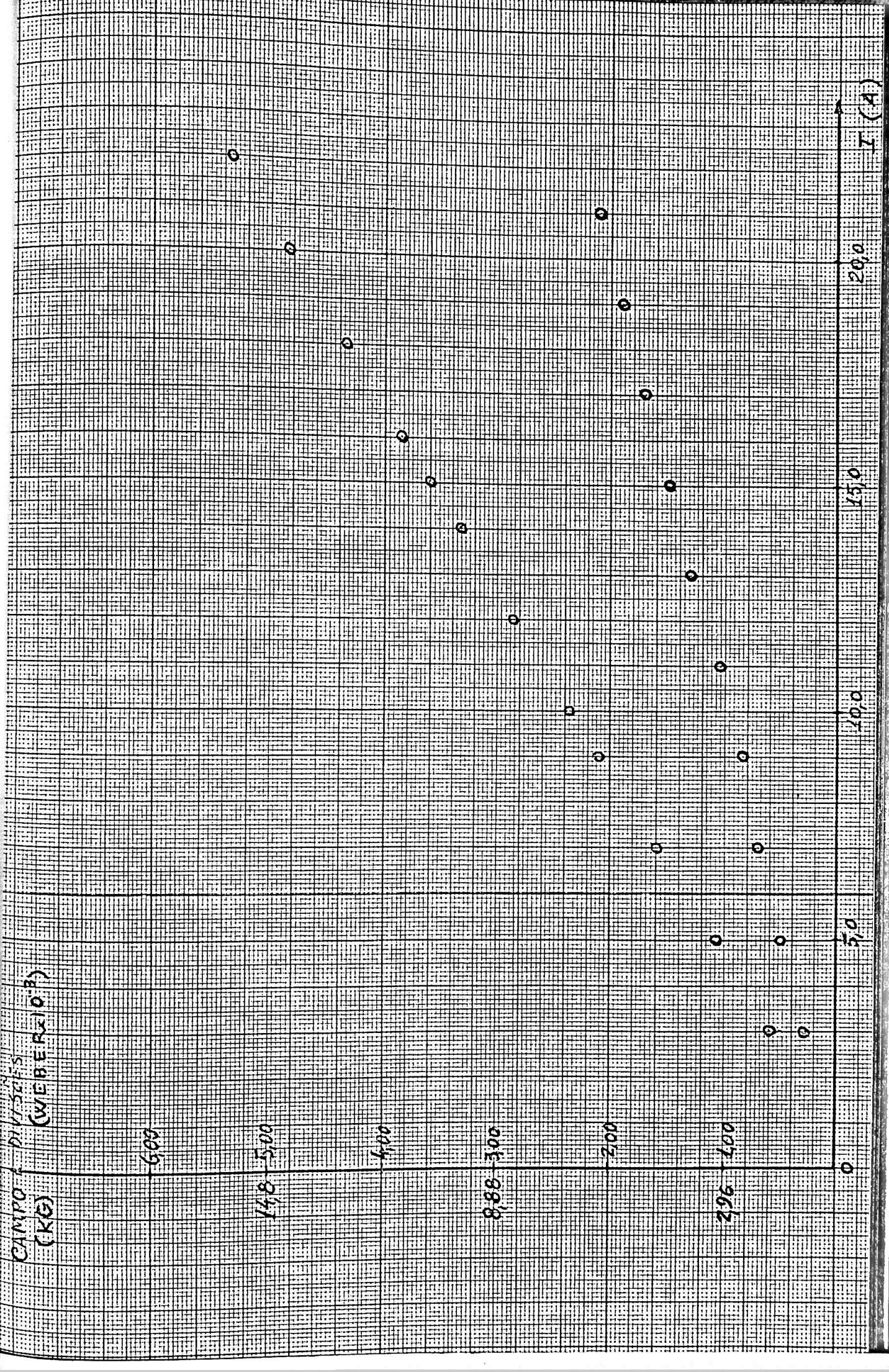
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

FIGURA 3 - Campo magnético em função da corrente elétrica para duas posições sobre o eixo da bobina supercondutora.

curva superior - posição 3,5 da figura 2

curva inferior - entre as posições 0 e 1 da figura 2



IV - MEDIDAS DA MAGNETO-RESISTÊNCIA LONGITUDINAL DE UMA RESISTÊNCIA DE CARVÃO.

IV.1 - Considerações teóricas.^{7,8,9}

A variação da resistência de um condutor na presença de um campo magnético é fato bastante conhecido e exaustivamente estudado numa grande variedade de condições. Apesar disto a nossa compreensão de tal fenômeno, mesmo sob o ponto de vista puramente qualitativo, ainda é muito incipiente.

Em princípio podemos dizer que a resistência de um material cresce com o campo magnético. São poucos os casos de magneto-resistência ($\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{R - R_0}{R_0}$, onde R_0 é a resistência para campo magnético nulo) negativa, sendo todos êles ocasionados provavelmente por mecanismos bem diferentes.

Em muitos casos funciona uma regra empírica estabelecida por Kohler⁷ (1938):

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = F \left(\frac{H}{\rho_0} \right),$$

onde F depende apenas do metal e de sua configuração geométrica.

Podemos distinguir basicamente dois tipos de magneto-resistência: a magneto-resistência transversal (quando o campo magnético aplicado H e a densidade de corrente J são perpendiculares, como no caso do efeito Hall) e a magneto-resistência longitudinal (quando o campo magnético é paralelo à corrente no fio). Na maioria dos casos os dois efeitos são da mesma ordem de grandeza, embora o efeito transversal seja ligeiramente maior.

Uma explicação quantitativa pode ser tentada através do estabelecimento da equação de transporte de Boltzmann, para campos externos pequenos, considerando colisões elásticas e binárias. No modelo do elétron livre podemos explicar o efeito Hall mas constatamos a inexistência de qualquer tipo de magneto-resistência. Podemos en-

entretanto considerar ainda superfícies de Fermi com simetria esférica mas levando em conta o efeito de portadores situados em duas ou mais faixas de energia que se sobrepõem. Neste caso também não temos o efeito longitudinal mas surge uma magneto-resistência transversal que é função de H do tipo $\frac{AH^2}{B+CH^2}$, tendendo portanto à saturação para campos magnéticos altos. Nos dois modelos a magneto-resistência longitudinal só poderia ser explicada pela distorção da superfície de Fermi, situação que realmente se verifica na maioria dos casos práticos.

No atual estágio do tratamento deste problema as medidas de magneto-resistência são de pouca valia para o estabelecimento da forma da superfície de Fermi dos condutores. Entretanto, um cálculo para campos magnéticos altos nos indica que a magneto-resistência ao invés de saturar cresce com H^2 nas direções de órbitas eletrônicas abertas, fornecendo-nos assim uma certa indicação sobre a geometria do espaço recíproco de um cristal único.

A magneto-resistência negativa já foi constatada em algumas ligas metálicas, em certos semicondutores e em metais nobres aos quais se adicionam diversos tipos de impurezas. Ziman⁷ nos relata uma série de casos e mostra que a ocorrência de um mínimo na resistência elétrica de certos materiais em função da temperatura (em regiões onde a resistência da rede é negligenciável) está intimamente relacionada com uma anomalia no poder termoelétrico e com o surgimento de magneto-resistências negativas. Não se têm entretanto explicações satisfatórias para este fenômeno — há inclusive hipóteses arrojadas, como a de Gorter⁷, que se refere a um novo princípio de termodinâmica. Nos casos em que a impureza é um metal de transição pode-se pensar (como Gerritsen⁷) que o comportamento anômalo se verifica em virtude de uma mudança na polarização magnética dos spins no entorno da impureza.

IV.2 - Resultados experimentais.

a) Características da amostra utilizada

Estudamos a influência de campos magnéticos sobre algumas resistências de carvão que eram antigamente muito usadas na confecção de receptores de rádio. Tais resistências têm servido em nosso Laboratório como excelentes termômetros (de $0,3^{\circ}\text{K}$ a 20°K) e foram largamente estudadas por G. Frossati.¹⁰ Pròximamente elas deverão ser utilizadas para o contròle de temperatura em experiências de detecção de efeitos do tipo "de Haas-van Alphen" e daí o interêsse em verificar o seu comportamento sob a ação de campos magnéticos.

As resistências originais foram cortadas em várias fatias que apresentavam à temperatura ambiente uma resistência de cerca de 1.300 Ohms. A fatia por nós utilizada tinha a forma de um prisma reto com altura de 1 cm e secção quadrada de 2 mm de lado.

As conexões elétricas eram feitas através de três fios de manganina: dois dêles bem enrolados e pintados com tinta prata em uma das extremidades do pequeno prisma, e o restante na outra. Nesta operação, conforme indicado na trabalho de Frossati,¹⁰ não se deveria empregar qualquer tipo de solda.

b) Montagem experimental

A pequena resistência de carvão foi colocada num orifício bem no centro do núcleo de lucite da bobina de prova; permanecia ali, com sua altura ortogonal à secção da bobina, sem estar submetida a nenhuma contração, prêsa apenas pelos fios de manganina. Podíamos assim medir a resistência e calibrar o campo concomitantemente em várias posições sobre o eixo da bobina supercondutora.

As medidas de resistência foram efetuadas com uma ponte de Wheatstone acoplada a um amplificador "lock-in", modelo HR-8, da "Princeton Applied Research Corporation, Princeton, NJ, USA", montagem esta descrita em trabalho anterior de N. F. Oliveira Jr.¹¹

A ponte possui uma resistência calibrada com subdivisões até 0,1 Ohm e é dotada de um condensador variável que possibilita a compensação da capacitância dos fios de ligação. O amplificador "lock-in" nos dava um sinal de referência de 150 Hz e que, através de um atenuador, era aplicado à ponte, dissipando na resistência de carvão uma potência da ordem de 10^{-9} w.

A tensão de saída do "lock-in" era também aplicada ao eixo X de um registrador X-T cujo eixo T se movia com uma velocidade de 8 mm/min. Para uma sensibilidade do registrador em que 0,1 Ohms correspondiam a 2 cm de deslocamento da pena sobre o papel, o ruído mantinha-se abaixo de 1 cm, o que correspondia a 0,05 Ohms. Com este aparelho poderíamos controlar quaisquer flutuações devido a variações de temperatura do banho. Aliás a única garantia de que a vazão pulsante do vapor de He⁴ era suficiente para permitir que o banho se mantivesse a pressão atmosférica constante e, portanto, a temperatura constante, era a flutuação muito pequena (inferior a 0,05 Ohm) dos valores da resistência.

c) Considerações sobre as medidas efetuadas

Realizamos várias corridas medindo a resistência elétrica em função da corrente injetada na bobina supercondutora para diversas posições sobre o seu eixo. Na figura 4 temos a resistência em função da corrente nas posições 4; 4,5 e 5 da figura 2. Nestas posições o cálculo do campo é imediato pois $B = 0,755 I$ como já mostramos anteriormente. As curvas obtidas, em três ciclos consecutivos de medidas, apresentam-se aproximadamente paralelas e dentro de um desvio que não excede 0,2 ohms (inferior a 0,05% do valor nominal da resistência). Com variações de campo de 0 a 17 KG, observamos que a resistência não retornava exatamente ao seu valor inicial; isto se relaciona com o aparecimento das curvas paralelas. Várias explicações podem ser propostas para comportamento tão peculiar: 1) variações da temperatura do

banho (as condições internas do criostato se alteram bastante após cada ciclo de funcionamento da bobina; além disto as variações notadas correspondem a 1°K ,¹⁰ flutuações perfeitamente plausíveis no banho); 2) variações de posição da amostra (não apenas segundo o eixo da bobina supercondutora, mas também em relação ao nível, sempre descendente, de He^4 líquido — correção hidrostática da temperatura, devido ao peso da coluna líquida sobre a amostra); 3) variações das resistências de contacto (devido às fortes mudanças nas condições da bobina supercondutora).

Tôdas as três curvas inferiores apresentam um valor mínimo da resistência para um campo no entôrno de $(3,5)^{5,2}$ KG. A existência dêste mínimo ocasiona o aparecimento de valores negativos da magnetoresistência ($R-R_0/R_0$), comportamento a que já nos referimos na primeira parte dêste capítulo.

A curva superior da figura 4 mostra a variação da resistência numa posição de campos fracos. Embora esta medida tenha sido feita após a resistência ter sido novamente aquecida à temperatura ambiente notamos que a forma da curva se conserva e que o valor mínimo se apresenta no mesmo ponto. A variação de cêrca de 25 Ohm (2%) existente entre esta medida e as outras pode ser explicada pela contração e modificação dos contactos de manganina e por sujeiras ou mesmo gordura que se tenha depositado na resistência durante a sua manipulação (a resistência foi retirada do criostato e as ligações foram sôltas e depois refeitas no intervalo entre as experiências).

Numa variação total de cêrca de 17 KG a resistência apresentou uma variação máxima de cêrca de 6 Ohm (0,5% do valor nominal). Tal comportamento poderá ser inclusive desprezado dependendo do tipo de precisão com que se desejar utilizá-lo como termômetro.

No trabalho de G. Frossati já se tinha verificado que as várias curvas da resistência em função da temperatura sempre se

mantinham paralelas quando se faziam medidas alternando-se aquecimentos e subsequentes resfriamentos da amostra de carvão até temperatura ambiente. No presente trabalho tem-se a indicação de que as curvas da resistência em função do campo também se conservam paralelas nestas condições.

Isto talvez signifique que tais saltos não dependem da substância de que é feita a resistência mas das características e do tipo de sua confecção como termômetro.

Na figura 5 apresentamos um gráfico obtido com o auxílio do registrador X-T (correspondente à experiência na posição de campos baixos) em que se verifica que as flutuações no valor da resistência são muito pequenas, indicando assim a constância da temperatura do banho.

É interessante notar que Frossati¹⁰ observou um mínimo no valor da resistência numa temperatura da ordem de 100°K . É provável que neste tipo de material também se possam estabelecer relações entre os dois fenômenos: mínimo na variação da resistência com a temperatura e mínimo na variação da resistência com o campo magnético, embora em regiões distintas de temperatura. A nossa amostra não tem constituição bem definida — é provável que seja composta de carvão em pó compactado com o auxílio de alguma resina; nada exclui a presença de impurezas constituídas por algum elemento de transição, que poderiam oferecer certas explicações para o comportamento anômalo.

FIGURA 4 - Variação da resistência com o campo magnético.

curvas inferiores - escala de resistências da esquerda
curva superior - escala de resistências da direita
- medidas tomadas entre as posições
0 e 1 da figura 2.

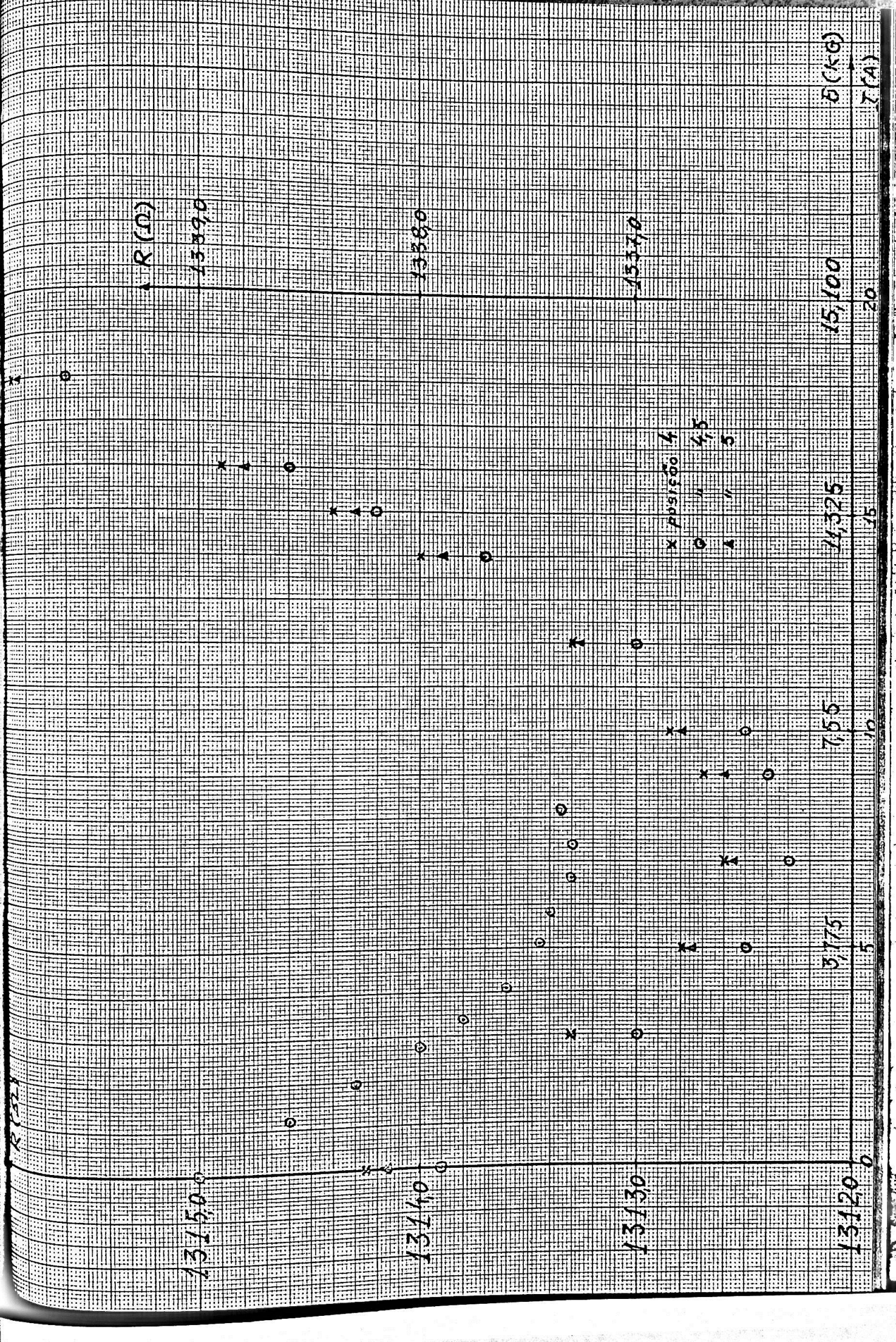
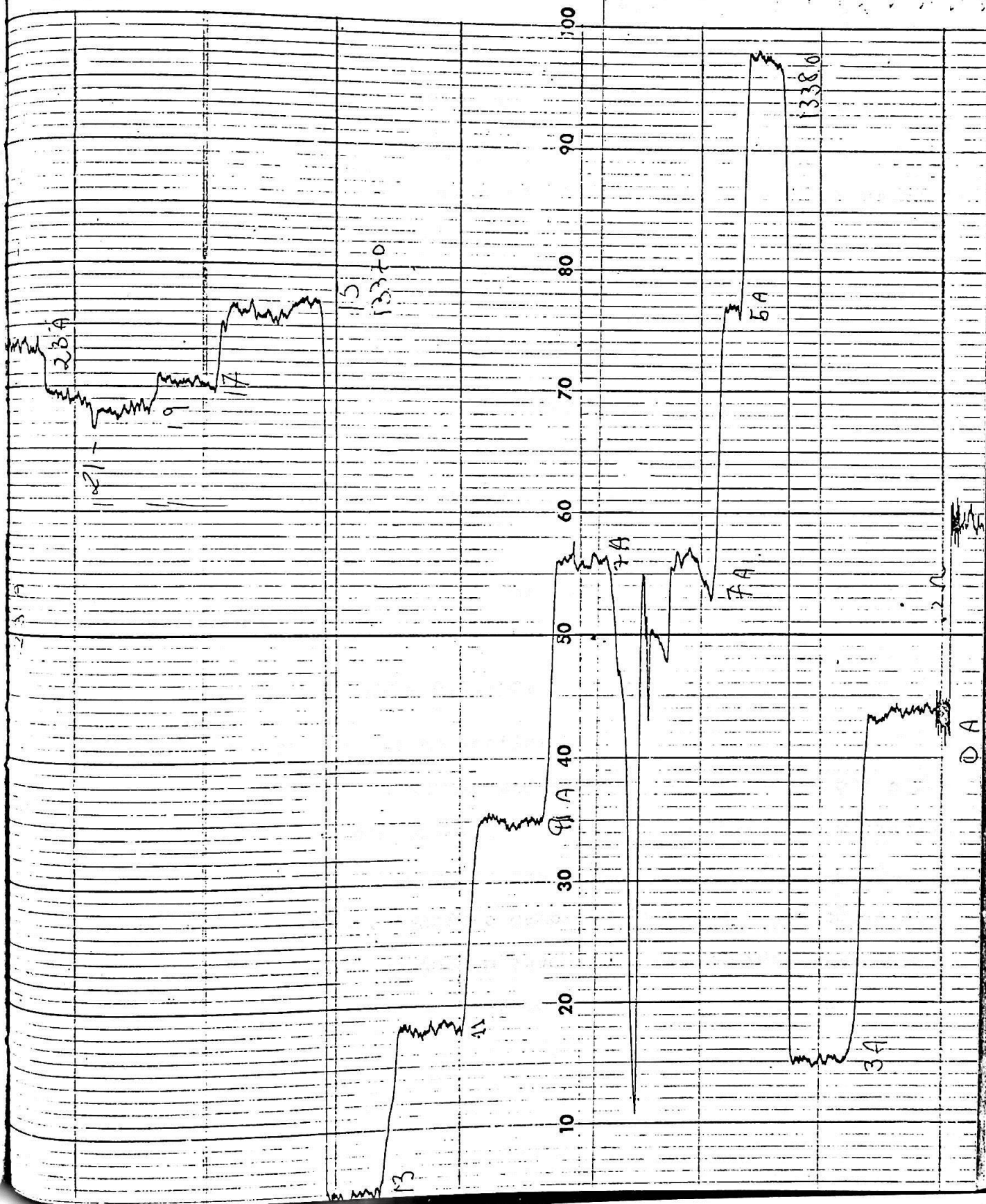


FIGURA 5 - Gráfico típico obtido com o registrador X-T (correspondente à curva superior da figura 4)



V - CONCLUSÕES.

O principal objetivo por nós almejado, a adaptação e o controle das características de funcionamento da bobina supercondutora, foi amplamente atingido. O gasto de He⁴ líquido, como já era esperado, foi bem menor do que o valor que havíamos calculado: o nível de He⁴ baixou apenas à razão de 15 cm/hora, quando o valor previsto era de 35 cm/hora. Tal fato se explica basicamente pela ação refrigerante dos vapores de He⁴. Também o N₂ líquido não se esgotou na caneca durante o tempo das experiências, e a sua reposição foi desnecessária. A bobina supercondutora funcionou de maneira normal, o curto-circuito agia de acordo com o aquecedor, e a corrente crítica realmente foi de 25 A.

Obtivemos entretanto uma razão campo-corrente inferior à prevista pelas especificações que nos foram enviadas (esperávamos obter 900 G/A e só obtivemos 755 G/A). Medimos um campo linear com a corrente aplicada e razoavelmente uniforme na região central sobre o eixo da bobina supercondutora, decaindo em direção aos bordos. Para a região central estabelecemos a correspondência:

$$B(\text{KG}) = 0,755 I(\text{A})$$

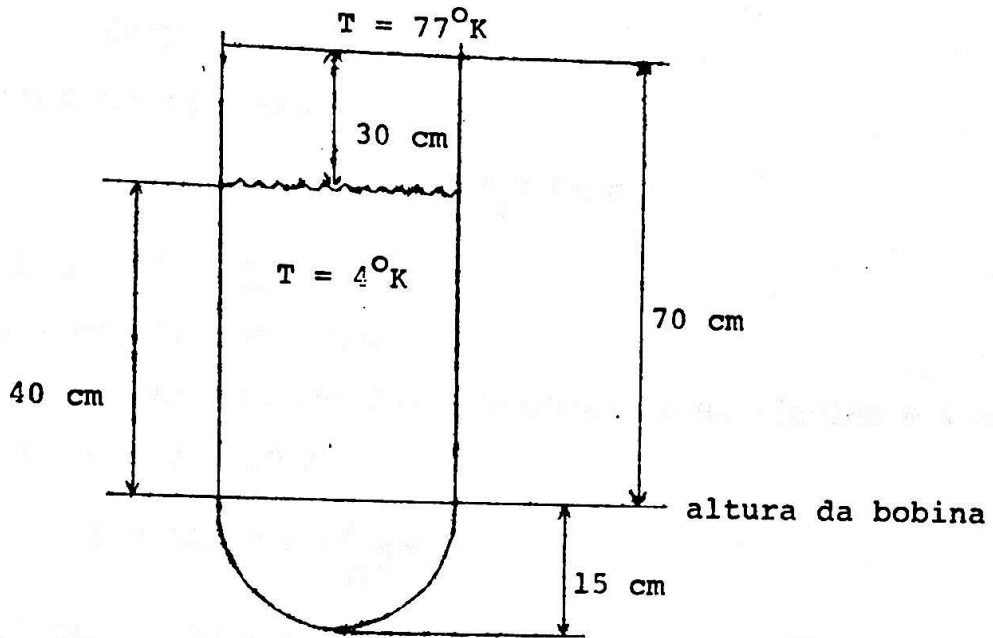
com um erro da ordem de 1% no coeficiente.

As medidas da magneto-resistência revelaram que a resistência de carvão à temperatura do He⁴ líquido possui um mínimo no entorno de 5,3 KG e apresenta uma variação máxima de 6,0 Ohm (0,5% do valor nominal a 4°K), quando o campo varia desde 0 até cerca de 17 KG. Verificou-se também que um aquecimento da resistência à temperatura ambiente apenas desloca paralelamente a curva obtida.

VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 1 - Guy Kendall White, Experimental Techniques in Low Temperature Physics, 2a. edição, Oxford, Clarendon Press, 1967.
- 2 - Y. B. Kim, Physics Today, 9, nº 17, 21 (1964).
- 3 - G. T. Meaden e P. Pelloux - Gervais, Cryogenics, 6, 93 (abril, 1967).
- 4 - Hoare, Jackson, Kurti, Experimental Cryophysics, Butterworths, 1961.
- 5 - J. L. Symonds, Methods of Measuring Strong Magnetic Fields, Reports on Progress in Physics, 18, 83 (1955).
- 6 - H. K. Dunn, Rev. of Sci. Instr. 10, 368 (1939).
- 7 - J. M. Ziman, Electrons and Phonons, Oxford, Clarendon Press, 1960.
- 8 - J. M. Ziman, Principles of the Theory of Solids, Cambridge, University Press, 1965.
- 9 - J. P. Jan, Galvanomagnetic and Thermomagnetic Effects in Metals, Solid State Physics, 5, (1957).
- 10 - G. Frossati - Tese a ser submetida ao Departamento de Física da F.F.C.L. da USP para a obtenção do título de "Mestre em Ciências".
- 11 - N. F. Oliveira Jr. - Tese de "Livre-Docência" apresentada à Cadeira de Física Aplicada da F.F.C.L. da USP (1968).

Cálculos criogênicos relativos à perda de He⁴ líquido



entradas de calor:

- 1) condução térmica pelos fios grossos de cobre
- 2) dissipação por efeito Joule (nos fios grossos de cobre e na resistência de constantan do interruptor)
- 3) outras perdas - condução de calor pelo gás He⁴, radiação (contribue bem menos - White¹ - capítulo VI), condução de calor e efeito Joule nos fios finos de cobre

1) Condução térmica pelos fios de cobre:

2 fios de cobre de 40 cm entre 77°K e 4°K

raio = r

$$Q = \bar{\lambda} \frac{T_2 - T_1}{d} A$$

onde

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$$

A função $\lambda(T)$ para o cobre eletrolítico pode ser encontrado em um dos

volumes do "Wadd Technical Report", Wadd Technical Report, 60, 56, parte II (outubro, 1960).

$$\overline{\lambda(T)} = 9,8 \text{ w/cm}^{\circ}\text{K}$$

considerando os dois fios temos:

$$\underline{\dot{Q} = 112,3 r^2 \text{ w}} \text{ (para } r \text{ em cm)}$$

2) Dissipação por efeito Joule:

a) nos dois fios grossos de cobre

parte do comprimento de cada fio mergulhada no He líquido = $l = 50 \text{ cm}$ vamos tomar $I = 30 \text{ A}$

$$\dot{Q} = RI^2 = \rho \frac{2l}{\pi r^2} I^2$$

para o cobre eletrolítico a $4,4^{\circ}\text{K}$ temos ("Handbook of Chemistry and Physics", Handbook of Chemistry and Physics, 41a. ed., Chem. Rub. (1959/60)

$$\rho = 0,014 \mu\Omega.\text{cm}$$

vamos adotar então este valor para a resistividade do nosso fio de cobre

$$\text{portanto } \underline{\dot{Q} = 4,0 \cdot r^{-2} \cdot 10^{-4} \text{ w}} \text{ (para } r \text{ em cm)}$$

b) no interruptor

O interruptor (ou aquecedor) é uma resistência de constante na qual não devemos dissipar mais do que 100 mw. Vamos então tomar neste caso:

$$\dot{Q} = 0,1 \text{ w}$$

3) Cálculo do valor ótimo de r

Vamos minimizar a função:

$$F(r) = Ar^2 + \frac{B}{r^2}$$

$$\text{onde } A = 112,3$$

$$B = 4,0 \times 10^{-4}$$

$$F'(r) = 2Ar - \frac{2B}{r^3} = 0 \quad \therefore \bar{r} = + \sqrt[4]{\frac{B}{A}}$$

$$\underline{\underline{\bar{r} \approx 4,35 \times 10^{-2} \text{ cm}}}$$

Vamos tomar então $\bar{r} = 5,0 \times 10^{-2} \text{ cm}$

4) Cálculo da perda de He⁴ líquido

— entrada de calor pelos fios:

$$\dot{Q} = 112,3 r^2 \approx 0,28 \text{ w}$$

— entrada de calor por efeito Joule através dos fios grossos:

$$\dot{Q} = \frac{4,0 \times 10^{-4}}{r^2} = 0,16 \text{ w}$$

— aquecedor:

$$\dot{Q} = 0,1 \text{ w}$$

— outras perdas:

$$\dot{Q} = 0,3 \text{ w}$$

gasto total: $\underline{\underline{\dot{Q} = 0,84 \text{ w}}}$

Calor latente do He⁴ (Handbook of Chemistry and Physics):

$$L = 0,65 \text{ cal/cm}^3$$

Volume gasto de He⁴ líquido por minuto:

$$V = \frac{Q_t}{L}$$

onde $Q_t = 0,84 \text{ j/seg} = 12,0 \text{ cal/min}$

portanto $\underline{\underline{V = 18,5 \text{ cm}^3/\text{min}}}$

Em termos da altura da coluna de He⁴ líquido temos:

$$\underline{\underline{H = 0,575 \text{ cm/min}}}$$

Em 10 min o nível de He⁴ líquido baixa de $\underline{\underline{5,75 \text{ cm}}}$

Cálculos criogênicos para a caneca de N₂ líquido

1) Entradas de calor

a) entre a tampa do criostato a 300°K e o bordo superior da caneca a 80°K (distância de 30 cm):

3 tubos de sustentação de alpaca

2 fios de cobre de raio $r = 1 \text{ mm}$ $\left. \begin{matrix} \curvearrowright \\ \curvearrowleft \end{matrix} \right\} r = 0,5 \text{ mm} \quad d = 1 \text{ mm}$

4 fios de cobre bem finos para a experiência

Pelos fios grossos de cobre temos:

$$A = \pi r^2 = \pi \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$l = 30 \text{ cm}$$

$$\Delta T \cong 220^\circ\text{K}$$

$$\lambda = 4,1 \text{ w/cm}^\circ\text{K} \quad (\text{White}) \quad (\text{tab. XV, pag. 186})$$

$$\dot{Q} = \frac{A}{l} \lambda \cdot \Delta T \quad \text{portanto } \dot{Q} = 0,95 \text{ w}$$

Como temos 2 fios $2\dot{Q} = 1,9 \text{ w}$

Pelos tubos de alpaca e pelos fios finos é bem menor a entrada de calor.

b) Potência dissipada na caneca por efeito Joule

$$\dot{Q} = I^2 R$$

Vamos tomar $I = 30 \text{ A}$

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$l = 60 \text{ cm}$ (levando em conta os dois fios). Por precau-

ção vamos tomar $l = 100 \text{ cm}$

resistividade do cobre:

$$\rho(75^\circ\text{K}) = 0,18 \mu\Omega \cdot \text{cm} \quad (\text{White})$$

$$\rho(100^\circ\text{K}) = 0,35 \mu\Omega \cdot \text{cm}$$

Vamos então tomar:

$$\rho = 0,3 \mu\Omega \cdot \text{cm}$$

Dáí vem

$$R = 9,5 \times 10^{-4} \text{ ohm}$$

$$\dot{Q} = 0,85 \text{ w}$$

2) Saída de calor para o banho de He⁴ líquido

Como já foi calculado no apêndice anterior:

$$\dot{Q} = 0,28 \text{ w}$$

evidentemente há um resfriamento grande da caneca no momento da transferência do He⁴ líquido. Muito He⁴ líquido se evapora ao entrar em contacto com a bobina supercondutora, o vapor frio sobe e pode até congelar o N₂ líquido que está dentro da caneca.

Vamos então tomar $\dot{Q} = 0,50 \text{ w}$

3) Cálculo da perda de N₂ líquido

$$\dot{Q}_{\text{total}} = 1,9 + 0,85 - 0,50 = \underline{\underline{2,25 \text{ w}}}$$

calor latente do N₂:

L = 47,6 cal/g (Handbook of Chemistry and Physics)

densidade do N₂ à temperatura de 77°K:

d = 0,804 g/cm³ (referência anterior)

portanto L = 47,6 x 0,804 x 4,18 j/cm³ = 160 j/cm³

Volume gasto de N₂ líquido por minuto:

$$v = \frac{\dot{Q}_t}{L} = 0,84 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

É interessante observar que o volume total da caneca é de 271 cm³.

1 - Dados para a verificação da uniformidade do campo (figura 2)

Posição	Fluxo do campo magnético (weber x 10 ⁻³)							
	I = 5A		I = 10A		I = 15A		I = 20A	
0	0,6	0,35	1,0	0,8	1,5	1,25	2,0	1,7
1	0,85	0,65	1,75	1,35	2,8	2,2	3,8	3,95
2	1,1	0,95	2,3	2,15	3,55	3,25	5,2	4,4
3	1,5	1,05	2,7	2,35	3,95	3,60	5,6	5,12
3,5	1,3	1,05	2,8	2,4	4,1	3,65	5,65	4,95
4	1,3	1,1	2,7	2,4	4,0	3,7	5,5	4,95
4,5	1,3	1,05	2,7	2,4	3,85	3,65	5,4	4,95
5	1,3	1,05	2,6	2,4	3,9	3,7	5,2	4,95
5,5	1,4	1,1	2,85	2,4	4,1	3,7	5,4	4,95
6	1,4	1,1	2,65	2,35	4,1	3,65	5,3	4,95
6,5	1,15	1,05	2,6	2,3	3,85	3,6	5,25	4,75
7	1,35	1,0	2,35	2,15	3,5	3,3	4,4	4,45
7,5	1,1	0,85	2,2	1,85	3,0	2,9	3,85	3,85
8	1,0	0,65	1,45	1,45	2,25	2,25	2,8	3,05
8,5	0,8	0,45	1,4	1,0	1,8	1,6	1,9	2,15
9	0,4	0,30	0,7	0,65	1,05	1,05	1,55	1,4
10	0,35	0,10	0,55	0,24	0,7	0,35	0,95	0,4

2 - Fluxo do campo magnético "versus" corrente para algumas posições sobre o eixo da bobina (figura 3).

Corrente (A)	Fluxo ($w \times 10^{-3}$)				
	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 4,5	Pos. 5	Pos. 5,5
3,0	0,6	0,6	0,5	0,55	0,6
5,0	1,08	1,13	1,05	1,05	1,13
7,0	1,6	1,63	1,5	1,6	1,65
9,0	2,1	2,17	2,05	2,1	2,14
10,0	2,35	2,4	2,3	2,35	2,4
12,0	2,86	2,9	2,85	2,9	2,93
14,0	3,36	3,4	3,35	3,37	3,42
15,0	3,6	3,7	3,6	3,65	3,75
16,0	3,87	3,93	3,85	3,9	3,91
18,0	4,35	4,4	4,35	4,4	4,45
20,0	4,85	4,93	4,85	4,9	4,95
22,0	5,35	5,42	5,35	5,4	5,42

APÊNDICE IV

1 - Resistência em função da corrente para algumas posições sobre o eixo da bobina (figura 4)

Corrente (A)	Resistência (Ohms)				
	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 4,5	Pos. 5	Pos. 5,5
0,0	1314,2	1314,25	1313,9	1314,15	1314,15
3,0	1313,2	1313,3	1313,0	1313,3	1313,2
5,0	1312,7	1312,8	1312,5	1312,75	1312,7
7,0	1312,5	1312,6	1312,3	1312,55	1312,5
9,0	1312,6	1312,7	1312,4	1312,6	1312,65
10,0	1312,75	1312,85	1312,5	1312,8	1312,8
12,0	1313,2	1313,3	1313,0	1313,25	1313,3
14,0	1313,85	1314,0	1313,7	1313,9	1314,0
15,0	1314,3	1314,4	1314,2	1314,3	1314,4
16,0	1314,75	1314,9	1314,6	1314,8	1314,85
18,0	1315,9	1315,9	1315,6	1315,85	1315,9
20,0	1316,9	1317,1	1316,9	1317,0	1317,1
22,0	1318,2	1318,45	1318,3	1318,3	1318,4

2 - Resistência em função da corrente numa região de campos baixos
(figura 4)

Corrente (A)	Fluxo ($w \times 10^{-3}$)	Resistência (Ohms)	
		Ida	Volta
0,0	0,0	1338,9	1339,0
3,0	0,3	1338,6	1338,75
5,0	0,5	1338,3	1338,4
7,0	0,7	1338,0	1338,15
9,0	0,85	1337,8	1337,9
11,0	1,05	1337,6	1337,6
13,0	1,3	1337,45	1337,45
15,0	1,5	1337,4	1337,4
17,0	1,7	1337,3	1337,3
19,0	1,9	1337,3	1337,3
21,0	2,1	1337,35	1337,35