

N. T. 53

HÉLION VARGAS

UM CONJUNTO DE BOBINAS
PARA MEDIDAS DA SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA
À TEMPERATURA DO He⁴ LÍQUIDO

Biblioteca Iluminada



SÃO PAULO
1967

SBI-IFUSP

305M810T2988
SBI-IFUSP 305M810T2988

Esta tese foi apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, em dezembro de 1967.

Para

Anna Maria, minha espôsa

e

Bolivar de Castro,

cuja amizade nos honra.

Para

Anna Maria, minha espôsa

e

Bolivar de Castro,

cujá amizade nos honra.

A G R A D E C I M E N T O S

A realização dêste trabalho teria sido impossível, não fôra uma bolsa de estudos da CAPES, e particularmente as facilidades criadas ao bolsista através do Laboratório de Estado Sólido e de Baixas Temperaturas do Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP que possibilitou a realização das experiências, e, finalmente, o Instituto Central de Física da Universidade Federal de Minas Gerais, pela complementação financeira.

Ao Prof. Nei F. de Oliveira Jr. devo a atenção constante e a dedicação insuperável, pela segura orientação na parte experimental e teórica desta tese.

Aos professores - Newton Bernardes, Carlos Quadros, Francisco de A. Magalhães Gomes, M. Lopes de Siqueira, Márcio Q. Moreno, e a inúmeros amigos, agradeço o apôio e estímulo que me prestaram, e a paciência com que me suportaram nêstes três anos de início de minha formação.

O zêlo e cuidados demonstrados por Oswald Cappello e Francisco de P. Oliveira durante as experiências, D. Stella Mendes Gonçalves na composição gráfica desta tese, serão sempre lembrados com gratidão.

S U M Á R I O

Este trabalho apresenta os resultados do planejamento, construção e testes de um conjunto de bobinas para medidas da susceptibilidade magnética de sais paramagnéticos à temperatura do He⁴ líquido, pelo processo da indutância mútua.

Modificou-se, na Geometria, um conjunto de bobinas proposto por McKim e Wolf. O novo conjunto apresenta um primário montado internamente no secundário, e êste, sendo composto em três secções: uma central, e duas de compensação nas extremidades.

Verificou-se que as modificações introduzidas proporcionaram as seguintes vantagens:

1. maior uniformidade do campo magnético na região onde são colocadas as amostras para medidas.
2. maior comodidade e rapidez nas operações experimentais.
3. maior precisão na medida de temperatura do He⁴ líquido através da pressão de vapor.

A sensibilidade e precisão do conjunto foram investigadas com amostras de Sulfato de Manganês e Amônia, $Mn(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, e Nitrato de Cério e Magnésio, $Ce_2Mg_3(NO_3)_{12} \cdot 24H_2O$.

Finalmente, foram estudados os êrros devidos às variações da indutância mútua M_0 do conjunto sem a amostra, e devidos a pequenas mudanças nas posições da amostra.

Í N D I C E

	Página
Agradecimentos	i
Sumário	ii
CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II. O MÉTODO DE MCKIM E WOLF	3
2.1 - Descrição.	3
2.2 - Vantagens do método	3
2.3 - Desvantagens do método em temperaturas do He ⁴	4
CAPÍTULO III. PROJETO DO CONJUNTO DE BOBINAS	6
3.1 - Avaliação da sensibilidade	6
3.2 - Desenho e construção dos carretéis	8
3.3 - Equilíbrio de zero	10
CAPÍTULO IV. CALIBRAÇÃO	12
4.1 - A amostra padrão	12
4.2 - Arranjo experimental	13
4.3 - Procedimento experimental	15
4.4 - Resultados	18
CAPÍTULO V. SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DO NITRATO DE CÉRIO E MAGNÉSIO EM PÓ, $Ce_2Mg_3(NO_3)_{12} \cdot 24H_2O$	20
CAPÍTULO VI. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES FINAIS	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

CAPÍTULO I
I N T R O D U Ç Ã O

Nêste trabalho são descritos o planejamento, construção e testes de um conjunto de bobinas para medidas absolutas da susceptibilidade magnética a temperaturas do He^4 .

Em baixas temperaturas, o método comumente usado para obtenção da susceptibilidade de pequenas amostras paramagnéticas é o da indutância mútua. Nêste processo, as amostras são colocadas no centro de um par de bobinas - primário e secundário - onde variações da susceptibilidade magnética da amostra são proporcionais às variações da indutância mútua das bobinas.

A precisão nas medidas depende de uma construção planejada e cuidadosa do conjunto de bobinas medidoras. Dois aspectos essenciais precisam ser levados em consideração: a indutância mútua M_0 do conjunto de bobinas sem a amostra, e a uniformidade do campo magnético produzido pelo primário na região a ser ocupada pelas amostras.

O primeiro, está no fato das variações de indutâncias mútuas serem muito pequenas, estando em geral compreendidas na faixa de micro a mili-henrys. Portanto, torna-se conveniente reduzir ao mínimo o valor de M_0 . Para isso, o secundário deve ser constituído de secções cujas indutâncias mútuas se compensem com uma grande precisão. Por outro lado, a estabilidade de M_0 é importante, sendo necessário estudar suas possíveis variações, com a temperatura, e nos ciclos de aquecimento até à temperatura ambiente. Instabilidades nos valores de M_0 poderão se constituir

numa fonte de êrros.

O segundo aspecto se refere à uniformidade do campo magnético do primário, na região em que serão colocadas as amostras. Este é importante, principalmente nas medidas de anisotropias, em que o campo será orientado segundo os eixos da amostra. Sua influência também é notada nos êrros provenientes de pequenas variações das posições da amostra, e nas correções de desmagnetização (fator de forma).

No capítulo 2 está exposto um método de medida proposto por McKim e Wolf e discutem-se algumas modificações.

Nos capítulos 3 e 4 são apresentados o projeto do conjunto, sua calibração, e resultados.

No capítulo 5, os resultados obtidos para uma amostra de Nitrato de Cério e Magnésio em pó são mostrados e discutidos.

Finalmente, no capítulo 6 são feitas considerações finais e conclusões do presente trabalho.

CAPÍTULO II

O MÉTODO DE MCKIM E WOLF

2.1 - Descrição.

Em 1956, McKim e Wolf¹ propuzeram uma construção de bobinas para a determinação de susceptibilidades magnéticas de pequenas amostras paramagnéticas, a temperaturas compreendidas desde o hélio líquido ao nitrogênio. A geometria do conjunto é mostrada na Fig. 1-A.

O secundário é constituído de duas bobinas idênticas, enroladas em oposição e montadas internamente no primário. As leituras são feitas deslocando-se a amostra sucessivamente do centro de um secundário ao outro. Desta forma, a variação da indutância mútua ΔM , em cada bobina secundária, devido à susceptibilidade da amostra será:

$$\Delta M = L_1 - M_0 = M_0 - L_2 \quad (1)$$

e portanto,

$$2 \Delta M = L_1 - L_2 \quad (2)$$

Nas duas expressões, M_0 é a indutância mútua do conjunto sem a amostra; L_1 e L_2 são as leituras feitas com a amostra no centro de cada secundário.

2.2 - Vantagens do método.

A expressão (2) mostra que esse método elimina o problema da indutância mútua M_0 , e também dobra a sensibilidade das medidas.

Entretanto, a grande vantagem apresentada pelo método consiste em obter medidas absolutas da susceptibilidade, quando a temperatura das bobinas não puder ser mantida constante. Quando isto ocorre, a dilatação térmica provoca variações fortes em M_0 , principalmente em temperaturas próximas à do nitrogênio líquido. Já à temperatura do hélio, onde os coeficientes de dilatação são praticamente nulos², efeitos desta natureza são muito pequenos.

2.3 - Desvantagens do método.

A grande desvantagem do método de McKim e Wolf à temperatura do hélio é ter que mover a amostra durante as leituras - das medidas. Acima do ponto λ (hélio I), tais movimentos provocam inhomogeneidades de temperaturas no banho, e como consequência, sua medida através da pressão de vapor torna-se imprecisa. Além disso, a correção da pressão hidrostática do líquido sobre a amostra é bastante dificultada. Estes efeitos são tão mais pronunciados quanto mais afastados estiverem os dois secundários. Por outro lado, a redução da distância entre eles acarreta uma diminuição da sensibilidade, tornando crítica a reprodutibilidade das posições da amostra.

Uma alternativa seria a substituição da segunda leitura (expressão 2) por uma leitura direta de M_0 , retirando-se para isso, a amostra da bobina.

Então:

$$\Delta M = L - M_0 \quad (3)$$

Desta maneira, as medidas da temperatura e as leituras de L podem ser feitas simultaneamente. O banho de hélio só será perturbado quando se retirar a amostra, e como M_0 varia muito pouco nestas temperaturas, inhomogeneidades não influirão na precisão da medida.

Será mostrado no capítulo seguinte que, com este procedimento, é possível obter uma precisão maior do que com o método de McKim e Wolf. Além disso, a operação experimental torna-se mais rápida e cômoda.

CAPÍTULO III

PROJETO DO CONJUNTO DE BOBINAS

No capítulo anterior foi analisado o método de McKim e Wolf. Será mostrado, a partir deste capítulo, como aquêles processo de medidas, com modificações na sua geometria e construção, torna-se mais preciso, além de trazer maior comodidade e facilidade nas operações a temperaturas de He^4 .

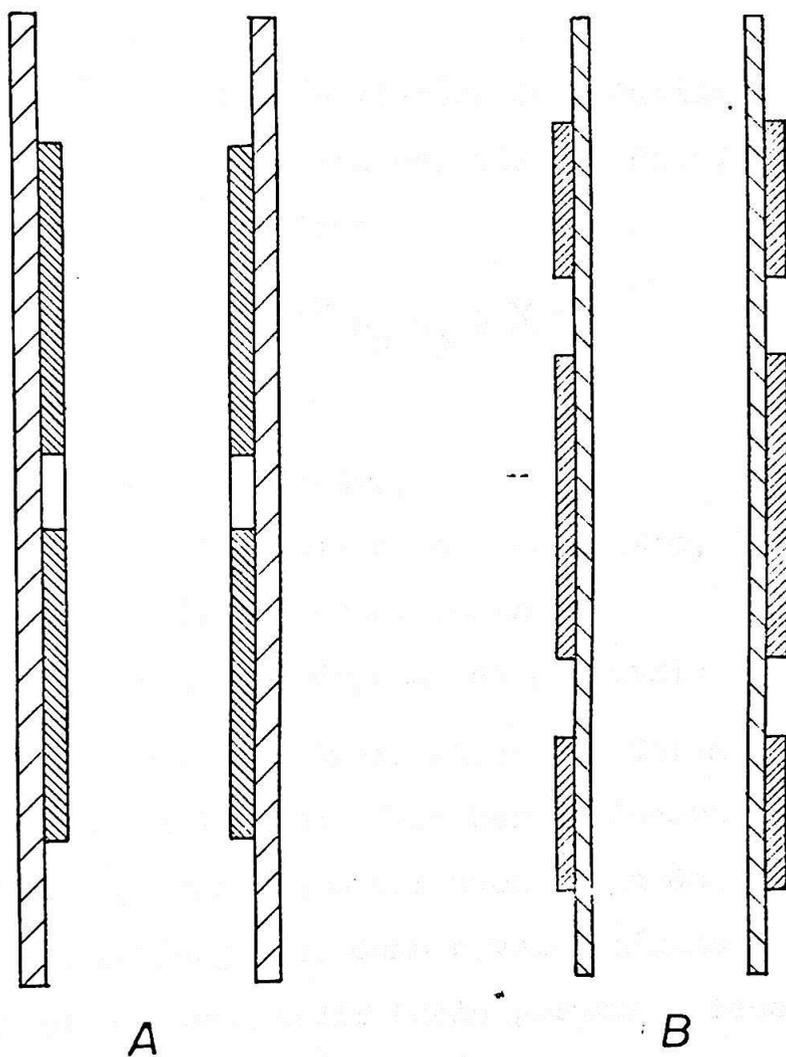
Uma das modificações consiste na redução da relação diâmetro/comprimento do primário. Para isso, o primário foi montado internamente ao secundário. A finalidade é aumentar a uniformidade do campo magnético produzido pelo primário.

Outra modificação está na forma como as secções do secundário se comporão. Estas foram divididas em 3 partes: uma principal S, para a medida, fixa no centro do primário; duas, S_1 e S_2 , de compensação nas extremidades. Assim, a amostra ficará durante a experiência, localizada numa região de grande uniformidade, que é o centro do primário. As duas secções de compensação possibilitarão reduções no valor de M_0 .

Com as modificações, o conjunto apresenta o aspecto da Fig. 1-B.

3.1 - Avaliação da sensibilidade.

As dimensões do conjunto foram determinadas de acordo com a disponibilidade de espaço dentro do nosso criostato. Dessa maneira, a sensibilidade pôde ser controlada, principalmente, pelo número de espiras do primário e secundário.



A

B

Fig. 1



PRIMARIO



SECUNDARIO

A relação que liga variações de indutância mútua e susceptibilidade χ de uma amostra esférica, é dada, no sistema C. G.S., por uma expressão do tipo

$$\Delta M = 16 \pi^2 n_s n_p G \chi V \quad (4)$$

onde:

V = volume da amostra;

n_s, n_p = número de espiras por centímetro, do primário e secundário respectivamente;

G = fator que só depende da geometria do conjunto.

As medidas de indutância mútua são feitas por uma ponte de corrente alternada do tipo Hartshorn, descrita por Jastram, Pillinger e Daunt³, capaz de medir numa faixa de 0 a 500 μ H, operando em 17 ciclos/segundo. Como o valor máximo das susceptibilidades (χV) que se quer medir (sais paramagnéticos) atinge 2×10^{-3} u C.G.S. de $\chi \times \text{cm}^3$, a sensibilidade deve ser da ordem de $2.5 \times 10^5 \mu\text{H}/\text{unid.C.G.S. de } \chi \times \text{cm}^3$.

3.2 - Desenho e construção dos carretéis.

Considerando as dimensões do criostato disponível e das amostras a serem medidas (~ 1 cm de diâmetro), os carretéis foram desenhados como mostra a Fig. 2.

O fator G , mencionado na secção anterior (expressão 4), pôde ser calculado a partir das dimensões do conjunto, e resultou $\sim 0,94$.

Para se obter aproximadamente a sensibilidade desejada, foi estabelecido então, usando a expressão (4), um número de espiras

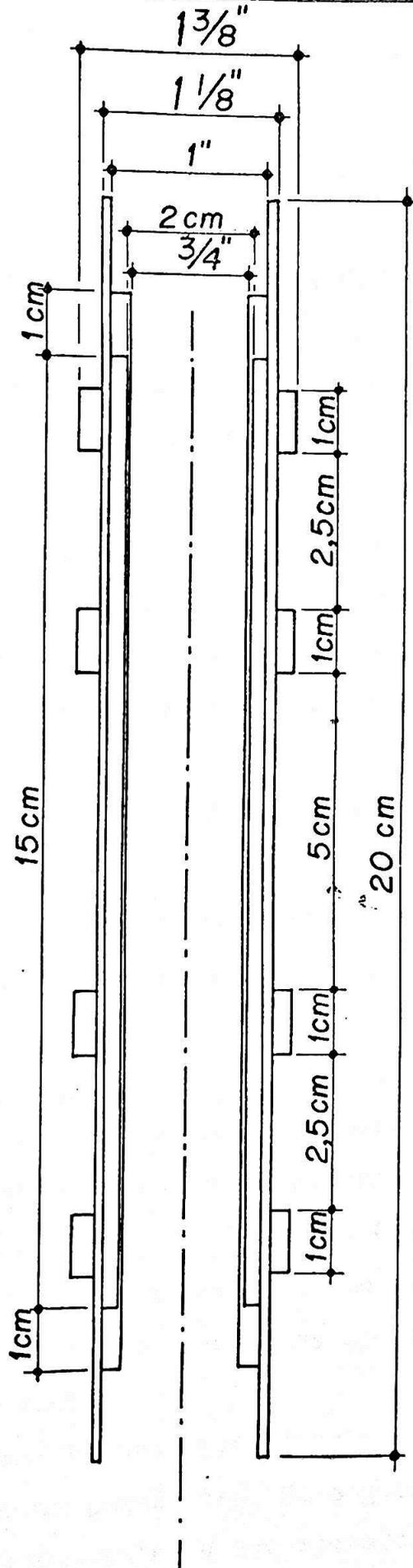


Fig. 2
 DESENHO DOS CARRETÉIS

ras por centímetro em 1.000/cm para o primário, e 2.000/cm para o secundário.

Os carretéis foram usinados em tubos de um tipo especial de fenolite que apresenta o mesmo coeficiente de dilatação do cobre. Assim, possíveis rupturas são evitadas quando houver o resfriamento do conjunto. Os separadores das seções do secundário, e entre os carretéis do primário e secundário, foram feitos também com fenolite e colados com Araldite. Suas alturas foram calculadas de modo a conter o número de espiras previsto, do fio escolhido.

Os enrolamentos foram feitos por uma máquina Laurent Frères, tipo C-12-C.

Finalmente, cada camada de espiras foi pintada com um verniz especial GE, número 7031.

3.3 - Equilíbrio de zero.

Foi mostrado em seções anteriores que dentre os problemas a serem resolvidos está o da minimização da indutância mútua M_0 do conjunto, na ausência de amostras. Com este intuito é que foram colocadas bobinas de compensação no secundário.

Serão descritas, a seguir, as operações necessárias para a redução do valor de M_0 .

Inicialmente foi centrado o primário internamente ao secundário, usando-se um paquímetro. Em seguida, foram enroladas sucessivamente espiras suplementares nos secundários de compensação, para compensar o decréscimo do campo do primário, até que se obtivesse um valor nulo para M_0 . Esta etapa inicial foi feita à temperatura ambiente. Como a sensibilidade da ponte é muito baixa nes-

tas temperaturas, devido à resistência elétrica das bobinas, foi necessário um ajuste fino à temperatura de He⁴.

Para isto, foi montado o conjunto num criostato de tal modo que deslismamentos micrométricos do primário dentro do secundário fossem possíveis. Assim ajustou-se M_0 a um valor mínimo conveniente ($\sim 10 \mu\text{H}$), bem próximo de zero. Foram necessárias várias tentativas para se obter este número, pois este valor depende da relação entre as indutâncias mútuas de cada secção do secundário. Depois disso, elevou-se a temperatura do conjunto até a temperatura ambiente com o máximo cuidado, e em seguida, foi colado o primário ao secundário com Araldite.

CAPÍTULO IV
C A L I B R A Ç Ã O

Nêste capítulo serão descritas as experiências iniciais com o conjunto de bobinas.

Dois problemas foram estudados. O primeiro se refere à técnica mais conveniente para execução das medidas, levando-se em conta a precisão dos resultados. O segundo é a própria calibração, ou seja, a relação entre a indutância mútua e as unidades C.G.S. de χ , através de uma amostra padrão.

4.1 - A amostra padrão.

Foi usado para calibração do conjunto o Sulfato de Manga nês e Anônea, $Mn(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ que é, dentre os sais paramagné ticos estudados experimentalmente⁴⁻⁶, o mais empregado.

O valor do fator espectroscópico "g" obtido por experiên cias de ressonância paramagnética⁷ para aquêle sal é igual a 2,000, e isotrópico dentro de uma parte em 10^4 . Deve-se isto ao fato do estado fundamental do íon magnético (Mn^{++}) ser um estado S, sendo muito pequena a influência do campo cristalino⁸. Por is so, à temperatura de He⁴, a susceptibilidade molar dêste sal obe dece à lei de Curie para spin-puro⁹

$$\chi_m = \frac{N_o \mu_o^2 g^2 S(S+1)}{3k(T+\theta)} = \frac{C_m}{T+\theta} \quad (5)$$

onde:

$$g = 2,000 = \text{fator espectroscópico;}$$

- N_0 = número de Avogadro;
 S = spin do íon = $\frac{5}{2}$;
 μ_0 = magneton de Bohr;
 k = constante de Boltzman;
 Θ = correção devida a efeitos cooperativos.

As experiências foram feitas com amostras em pó, em forma de pílulas, colocadas numa caixa cilíndrica de 13 mm de diâmetro, por 20 mm de altura. O material usado para a construção da caixa da amostra foi uma resina (Epoxi-Epibond, 1004) que se funde a 150°C e polimeriza-se. Foi constatado por meio de um teste à temperatura do hélio que o material era não magnético.

4.2 - Arranjo experimental.

O conjunto de bobinas foi prêsso à cabeça de um criostato de vidro Pyrex por meio de um tubo de fenolite. O arranjo experimental é mostrado na Fig. 3.

A caixa da amostra foi suspensa por uma vareta de Araldite até um tubo fino de fenolite que terminava num dispositivo capaz de mover o conjunto caixa-vareta, para cima e para baixo.

As ligações elétricas do conjunto de bobinas à ponte de indutância mútua foram feitas da seguinte maneira: internamente ao criostato, por meio de fios de manganina de 31,01 ohms/pé; externamente, através de um cabo blindado. A manganina tem a vantagem de possuir uma resistência praticamente independente da temperatura e, portanto, insensível às variações do nível de hélio líquido. Além disso, tem também uma baixa condutividade térmica, reduzindo assim entradas de calor no banho.

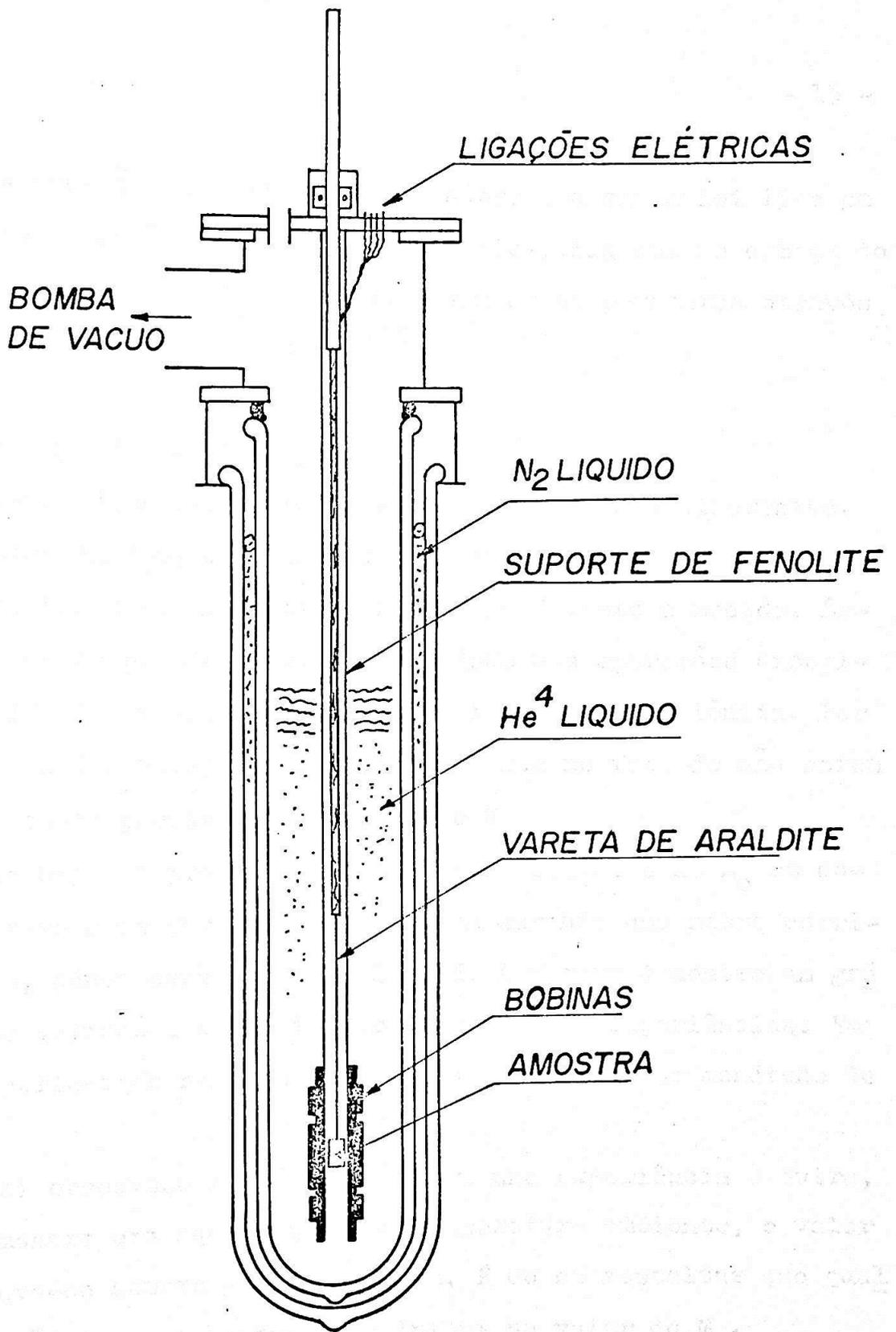


Fig. 3

O CRIOSTATO DE MEDIDAS

A pressão de vapor do banho sobre a amostra foi lida em um conjunto de manômetros (óleo e mercúrio), ligados na cabeça do criostato. As pressões foram convertidas em temperaturas através da Escala de Temperaturas de 1958¹⁰.

4.3 - Procedimento experimental.

As medidas foram feitas por dois processos diferentes.

No primeiro, M_0 foi medido no início e no final da experiência, evitando-se movimentos da amostra durante a medida. Este procedimento apresenta maior comodidade nas operações experimentais, além de diminuir o tempo de duração da experiência. Por outro lado, a desvantagem desta técnica está no fato de não serem levadas em conta possíveis variações de M_0 .

No segundo processo, foram feitas leituras de M_0 em cada temperatura e as variações observadas durante uma mesma corrida de hélio, nunca excederam a $0,25 \mu H$. A figura 4 mostra um gráfico destas variações com a temperatura em duas experiências. Em algumas experiências notamos um ligeiro decrescimento monótono de M_0 .

Foi observado também que, entre uma experiência e outra, quando a amostra era aquecida até à temperatura ambiente, o valor de M_0 manteve-se sempre dentro de $1 \mu H$. É de se ressaltar que qualquer alteração da posição dos fios influi no valor de M_0 .

O erro devido à não reprodução das posições da amostra foi estudado deslocando-a em torno do ponto de máxima indutância mútua (M_{max}), e medindo suas variações (ΔM) em função da posição. O resultado está demonstrado na Fig. 5.

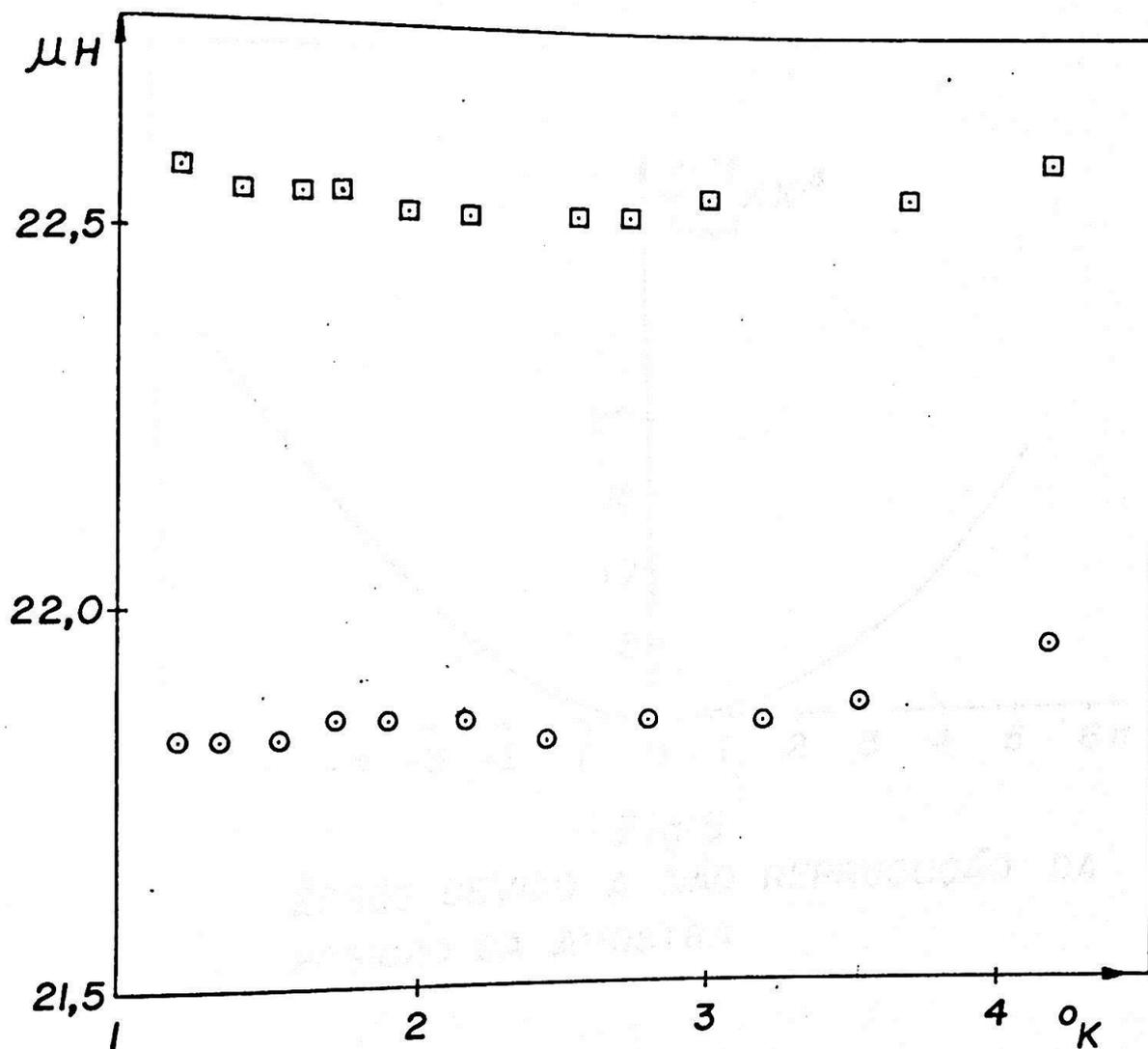


Fig. 4
 VARIACÃO DE μ_0 COM A TEMPERATURA
 EM DUAS EXPERIÊNCIAS FEITAS

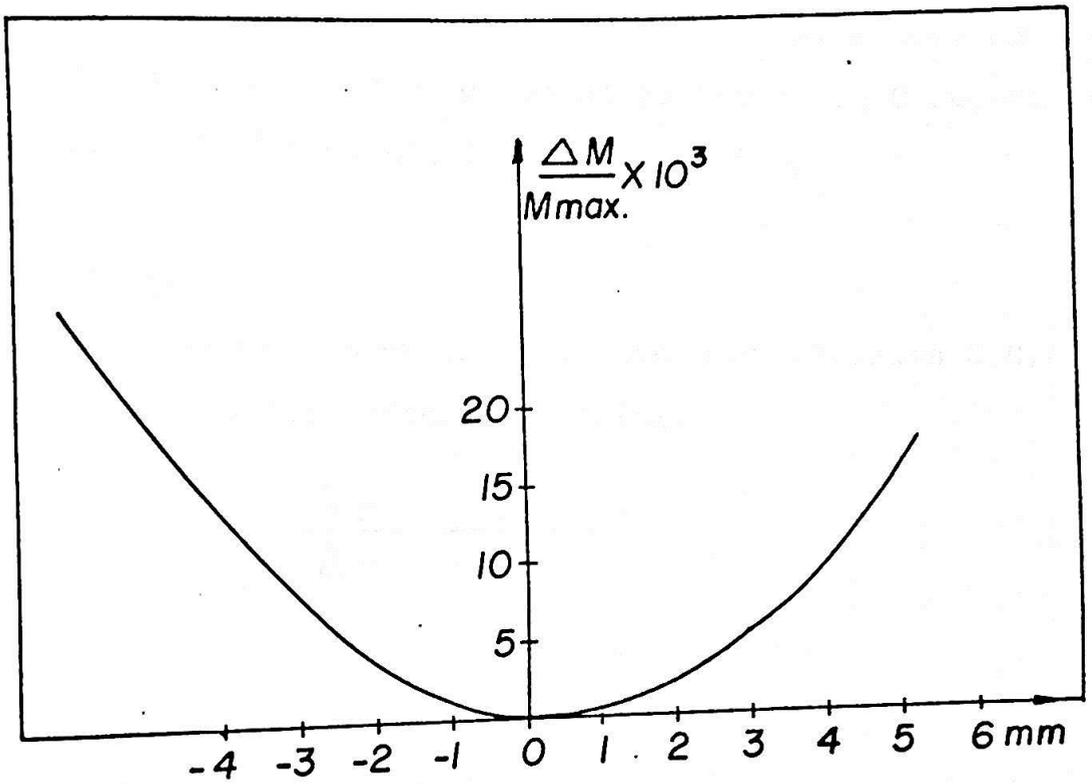


Fig.5
ÊRROS DEVIDO A NÃO REPRODUÇÃO DA
POSIÇÃO DA AMOSTRA

O gráfico mostra que êrros menores do que 1/1000 na indutância mútua requerem uma precisão na centragem de 2 mm, em torno do máximo, o que é bastante fácil de se obter.

4.4 - Resultados.

Para converter as unidades da ponte em unidades C.G.S. de susceptibilidade, foi definido um fator,

$$\gamma = \frac{\chi_m}{\Delta M} \frac{m}{M.M.} \quad (6)$$

onde:

ΔM = leitura da ponte menos M_0 ;

m = massa da amostra;

M.M. = massa molecular por íon.

Assim, a expressão da susceptibilidade molar do sulfato de Manganês e Amônia pode ser escrita:

$$\chi_m^{-1} = \frac{m}{\Delta M \gamma M.M.} = \frac{T + \theta}{C_m} \quad (7)$$

de onde

$$\Delta M^{-1} = \frac{\gamma M.M.}{m C_m} (T + \theta) \quad (8)$$

A equação (8) define uma linha reta, com $(\Delta M)^{-1}$ e T como variáveis. Pelos desvios mínimos quadráticos, foram ajustados os pontos experimentais a esta equação e γ foi determinado usando $C_m = 11,189 \times 10^{-3}$ u C.G.S. de $\chi \times ^\circ K/g$.

O êrro em γ , depende não só da precisão nas medidas como também da precisão na determinação da massa da amostra e de sua

pureza. As amostras usadas tinham aproximadamente 0,2 g e foi estimado o erro relativo na determinação do número de íons $\frac{n}{M.M.} N_0$ em aproximadamente $\frac{1}{1.000}$.

Das diversas experiências, o melhor valor de γ resultou ser igual a:

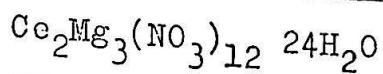
$$\gamma = (20,27 \pm 0,04) \times 10^{-9} \text{ u C.G.S. } \chi \times \text{cm}^3/\text{unidades da ponte de I.M.,}$$

sendo que cada unidade da ponte corresponde a $5 \times 10^{-3} \mu\text{H}$.

É conveniente dizer que para amostras muito grandes este valor de γ pode ser inadequado devido à inhomogeneidade do campo do primário. Foi estimado que a aplicabilidade deste valor de conversão, dentro do erro experimental, se restringe a amostras de até $1,5 \text{ cm}^3$ aproximadamente.

CAPÍTULO V

SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DO NITRATO DE CÉRIO E MAGNÉSIO EM PÓ,



Para se investigar a precisão nas medidas do conjunto me didor, foi escolhido um sal mais fraco do que o sulfato de Manga- nês e Amônia: o Nitrato de Cério e Magnésio, $\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$.

A temperatura do hélio, a susceptibilidade magnética dês te sal segue rigidamente uma lei de Curie, com um termo indepen- dente da temperatura¹¹:

$$\chi = \frac{C}{T} + \chi_0 \quad (9)$$

Para uma amostra em pó de 2,1831 g, foi obtido um conjun- to de números ΔM em função da temperatura. Estes números foram ajustados pelos desvios quadráticos mínimos à reta $\Delta M = \alpha T^{-1} + \beta$. Usando o valor de γ do capítulo anterior, os melhores valores de α e β determinaram para a susceptibilidade por grama do Nitra- to de Cério e Magnésio:

$$C_g = (2,667 \pm 0,010) \times 10^{-4} \text{ u C.G.S. de } \chi \times \text{°K/g} \quad (10)$$

e

$$\chi_{og} = (1,936 \pm 0,022) \times 10^{-5} \text{ u C.G.S. de } \chi / \text{g} \quad (11)$$

A figura 6 mostra os desvios à melhor reta obtida. Estes desvios aumentam em temperaturas baixas, o que se deve provável- mente à imprecisão na medida da temperatura. De um modo geral, o gráfico da Fig. 6 nos mostra que os erros acidentais devidos ao processo de medida podem ser mantidos dentro de 0,4 % para suscep

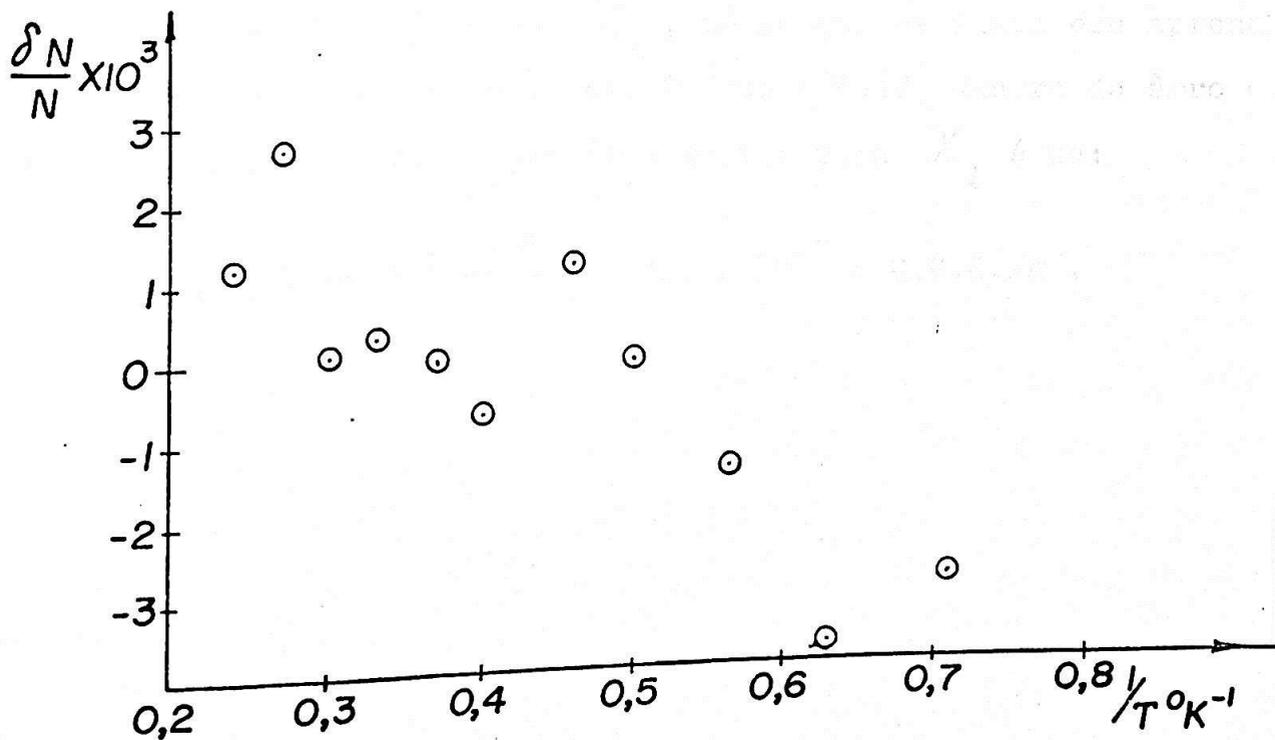
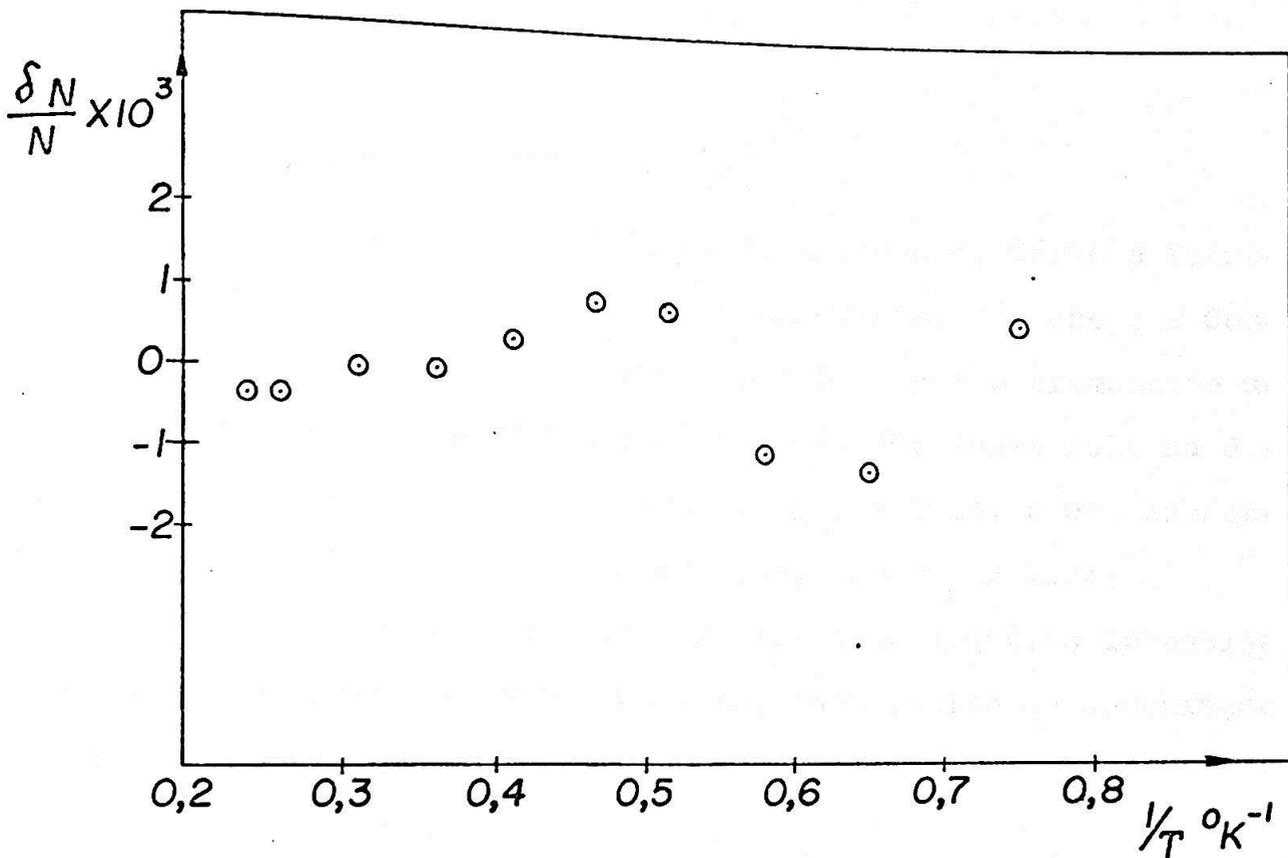


Fig. 6

DESVIOS RELATIVOS À MELHOR RETA
 $N = \alpha \frac{1}{T} + \beta$ PARA DUAS EXPERIÊNCIAS
 COM $\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

INSTITUTO DE FÍSICA
 Serviço de Biblioteca e
 Informação
 Tombo: _____



tibilidades da ordem de 10^{-4} u C.G.S.

As propriedades magnéticas do Nitrato de Cério e Magnésio foram anteriormente investigadas em cristais únicos por Cooke, Duffus e Wolf¹² que verificaram ser êste sal extremamente anisotrópico, apresentando uma susceptibilidade quase nula na direção do eixo trigonal do cristal, com $g_{\parallel} = 0.25$, e uma susceptibilidade grande perpendicular ao eixo, com $g_{\perp} = 1.84$.

Como o êrro experimental do trabalho daqueles investigadores é considerável ($\sim 5\%$), pode-se, para efeito de comparação, desprezar a contribuição de χ_{\parallel} , para a susceptibilidade magnética em pó dêste sal.

Fazendo $\chi_{\text{pó}} = \frac{2}{3} \chi_{\perp}$, vê-se que os dados ora apresentados concordam com os de Cooke, Duffus e Wolf, dentro do êrro experimental, pois o valor por êles medido para χ_{\perp} é de:

$$\chi_{\perp} = \frac{4.1 \times 10^{-4}}{T} + 3.2 \times 10^{-5} \text{ u C.G.S./g.}$$

CAPÍTULO VI

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES FINAIS

O objetivo d'êste trabalho foi o de propor o planejamento, construção e testes de um conjunto de bobinas para medidas da susceptibilidade magnética de pequenas amostras paramagnéticas a temperaturas do He⁴ líquido, pelo método da indutância mútua.

O conjunto foi planejado para uma sensibilidade de $2,5 \times 10^5 \mu\text{H/u C.G.S. de } \chi \times \text{cm}^3$.

Os testes realizados mostraram que para amostras desde 10^{-4} u C.G.S. de $\chi \times \text{cm}^3$, uma precisão geral da ordem de 0,4 % pôde ser mantida. Dentro dessa precisão são incluídas as imprecisões nas medidas das temperaturas, obtidas através da pressão de vapor do He⁴.

Com a finalidade de diminuir as imprecisões nas medidas de temperatura na região do hélio I (acima do ponto λ), e também a de aumentar a uniformidade do campo do primário, modificou-se um processo de medidas proposto por McKim e Wolf. Os resultados foram satisfatórios, pois as experiências feitas mostraram uma precisão geral maior naquela região.

Uma análise das flutuações de M_0 , mostraram que estas - sempre estiveram dentro de $0,25 \mu\text{H}$, o que corresponde a 10^{-6} u C.G.S. de $\chi \times \text{cm}^3$. Assim estas flutuações podem ser desprezadas quando a susceptibilidade das amostras atinge um valor da ordem de 10^{-3} u C.G.S. de $\chi \times \text{cm}^3$. Quando isto ocorre, as operações experimentais tornam-se mais cômodas e rápidas, porque não se torna necessária a medida de M_0 em cada temperatura.

O conjunto foi calibrado com uma amostra de Sulfato de

Manganês e Amônia, colocada na região de maior sensibilidade, resultando um valor de $\chi v / \Delta M = (20,27 \pm 0,04) \times 10^{-9}$ u C.G.S. χ cm³ / unidades da ponte de indutância mútua. O valor de cada unidade da ponte corresponde a $5 \times 10^{-3} \mu H$.

O erro devido à não reprodução da posição da amostra foi estudado e resultou desprezível numa região de 2 mm, em torno do ponto de máxima sensibilidade.

Posteriormente aos testes aqui descritos, o conjunto foi usado nas medidas da susceptibilidade de sais hidratados de Ni⁺⁺ ¹³ em substituição a um conjunto medidor idêntico ao descrito por McKim e Wolf, de mesma sensibilidade, e foi observada uma melhoria sensível na concordância com as curvas teóricas previstas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. F. R. McKim and W. P. Wolf, J. Sci. Instr., 34, 64 (1957).
2. "A Compendium of the Properties of Materials at Low Temperature Part II. Properties of Solids, Victor J. Johnson, General Ed.
3. W. L. Pillinger, P. S. Jastram, J. G. Daunt, Rev. Sci. Instr., 29, 159 (1959).
4. E. Ambler and R. P. Hudson, Reports on Progress in Physics, 28, 270 (1954).
5. F. E. Hoare, Jackson and Kurti, "Experimental Cryophysics" - Butterworths Scientific Publications, London, pg.198 (1961).
6. D. de Klerk, "Handbuch der Physik", Band XV - Springer Verlag - Berlin, pg.102 (1956).
7. B. Bleaney and D. J. E. Ingram, Proc. Roy. Soc., A 205, 336 (1951).
8. E. U. Condon and Shortley, "The Theory of Atomic Spectra" - Cambridge University Press, London (1935).
9. B. I. Bleaney and B. Bleaney, "Electricity and Magnetism", Oxford at Clarendon Press, pg.563 (1957).
10. The "1958 He⁴ Scale of Temperatures" - National Bureau of Standards Monograph 10 - (1960).
11. D. de Klerk, "Handbuch der Physik", Band XV - Springer Verlag - pg.117 (1956).
12. A. H. Cooke, H. J. Duffus and W. P. Wolf, Phil. Mag., 44, 623 (1953).
13. Nei F. de Oliveira Jr., "Estudo das Propriedades Magnéticas de Um Íon de Níquel sujeito a um Campo Cristalino Octaédrico" (Tese de Doutorado) - USP (1966).

