

Relatório Final de Iniciação Científica – F590:

**Construção de Célula de Pressão e Estudo da Transição
Magnética do $\text{EuNi}_2(\text{Si,Ge})_2$**

Grupo de Metais e Ligas

UNICAMP - Instituto de Física Gleb Wataghin

13/06/2009



Aluno: José Carlos Botelho Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Flavio C. G. Gandra

1. Resumo do plano de trabalho

O objetivo do projeto consiste na projeção e construção de uma célula de pressão que proporcione pressões da ordem de 1 GPa para a realização de medidas no equipamento comercial PPMS (Physical Property Measurement System) da Quantum Design. Temos como foco principal as medidas de magnetização desde baixas temperaturas, 2K, até altas temperaturas, 300K. O equipamento possibilita a realização de medidas entre 0 e 9 T. Temos também muito interesse em desenvolver uma célula capaz de operar em um calorímetro com elementos Peltier, construído por alunos de mestrado do laboratório. O ideal seria encontrar uma solução em comum para ambos os equipamentos, porém, devido às limitações de espaço físico presentes no calorímetro, acabei não conseguindo desenvolver uma célula em tempo hábil que se adequasse ao tamanho necessário do calorímetro e fosse funcional, conforme foi mostrado no relatório anterior. Foi desenvolvida então, uma célula de pressão do tipo pistão, com dimensões que se adequassem ao PPMS, para medidas de Magnetização versus Temperatura sob diferentes pressões, a fim de que, futuramente sejam estudadas as transições de valência e comportamento magnético de materiais ferromagnéticos, que são objetos de estudo do grupo do laboratório. Por enquanto, vamos nos concentrar nas medidas de magnetização.

Utilizamos sempre o elemento químico chumbo para aferir a pressão aplicada. Sabe-se que o chumbo apresenta transição supercondutora, que ocorre em $T_c=7,01K$, no entanto, com a aplicação de pressão, a temperatura de transição sofre alteração de acordo com a equação abaixo^[8]:

$$P(GPa) = -2,7347.T_c(K) + 19,6898$$

Portanto, tomamos curvas de magnetização em função da temperatura, MXT, que mostra claramente a transição supercondutora do chumbo para verificação da pressão na célula.

Com a célula em funcionamento, fiz então um breve estudo do comportamento da liga $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x)_2$ sob diferentes pressões. O principal motivo da escolha dessa série deve-se ao fato de que pequenas pressões aplicadas proporcionam grandes variações da temperatura de valência^[3]. Nesse artigo, os autores comparam a pressão hidrostática com a pressão química, decorrente da substituição de átomos de Ge por Si. Com os dados obtidos com nossa célula, podemos confrontá-los com os dados obtidos por H. Wada^{[5][6]}, verificando a eficiência de nossa célula de pressão.

Embora exista um extenso estudo sobre essa liga e seu comportamento sob diferentes pressões, campos magnéticos, ou concentrações, ainda há muito que ser discutido, e continuaremos a investigar o comportamento da liga sob esses parâmetros externos em trabalhos futuros.

2. Projeto da Célula de Pressão do Tipo Pistão-Parafuso e Métodos de Medida.

2.1. Projeto Da Célula e Método de Pressão Hidrostática:

Um método de pressurização bastante utilizado sem que haja danos à amostra é o método de pressão hidrostática. Nesse método, temos um recipiente onde é colocado um líquido incompressível, juntamente com a amostra a ser medida. Aplica-se pressão sobre o recipiente e o líquido no seu interior transmite essa pressão para a amostra. Para utilizarmos esse método, projetamos uma célula feita de uma liga de cobre-berílio 2%, tratada termicamente, com dureza de 38 HRC (escala Rockwell) que consiste em um cilindro com diâmetro externo de 6 mm e diâmetro interno que varia entre 3 mm e 4 mm. Dentro desse cilindro colocamos uma cápsula de teflon, que será o recipiente no qual se coloca o líquido incompressível (utilizei o óleo mineral Nujol como meio transmissor de pressão) juntamente com o manômetro de chumbo e a amostra. Acima dessa cápsula de teflon coloca-se um pistão, também feito de CuBe, que será o responsável pela transmissão de pressão ao recipiente de teflon. Por fim, temos um parafuso (CuBe) que serve para evitar que o pistão retorne à posição original, depois de pressurizado, assegurando que a pressão na célula seja mantida, O material da célula, CuBe, foi escolhido, conforme explicado no relatório anterior, devido às suas excelentes propriedades mecânicas aliadas a um baixo sinal magnético^{[1][2][4]}. Abaixo segue o projeto da célula, desenhado no programa AutoCAD® 2007:

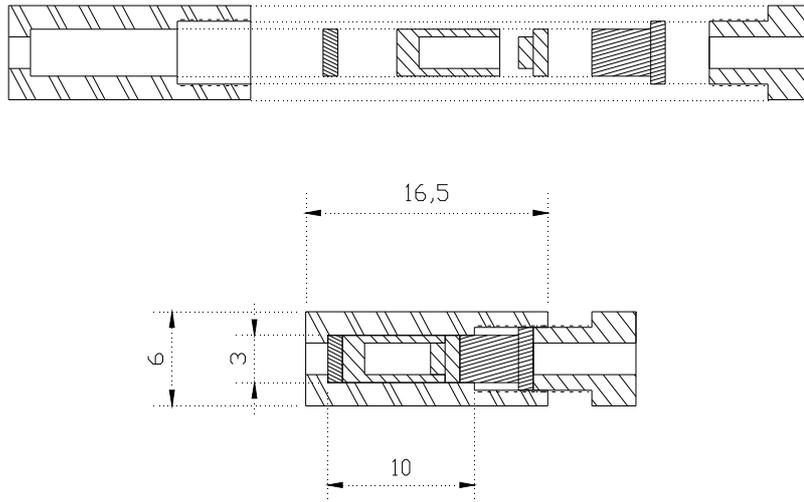


Fig. 1: Projeto da célula de pressão do tipo pistão-parafuso. No desenho de cima vemos as peças separadamente; da esquerda para direita temos: cilindro principal, anel de proteção, capsula de teflon seguida da sua tampa, pistão e parafuso de fixação. No desenho de baixo temos a célula montada com algumas medidas (em mm).

Utilizamos uma prensa hidráulica comercial para aplicarmos pressão ao sistema. Pode-se notar que há um furo no parafuso da célula, por onde será colocado um pequeno pino de tungstênio, que transmitirá diretamente ao pistão a pressão exercida pela prensa. Dessa forma, à medida que fazemos pressão sobre o pistão, rosqueamos o parafuso aos poucos que é transmitida gradativamente à cápsula de teflon e, conseqüentemente, à amostra. O furo na parte de baixo da célula serve para que retiremos o conteúdo do cilindro principal após a utilização da célula, para uma nova utilização. O tamanho da célula foi otimizado para que a contribuição magnética da mesma fosse minimizada.

2.2. Métodos de Medidas: Funcionamento do PPMS e Curvas de Magnetização DC.

Para realizar as medidas de magnetização utilizamos o equipamento comercial PPMS (Physical Property Measurement System) da Quantum Design. Esse equipamento possibilita realizar medidas de magnetização, calor específico ou resistividade em função da temperatura (2 a 400 K) ou campo magnético (-9 a 9 T). O equipamento consiste principalmente de um cilindro grande com diâmetro interno de aproximadamente 7,7 mm, onde é colocado um flange com a amostra. Existem bobinas ao longo do cilindro que geram os campos magnéticos necessários para as medidas. A técnica de medida de magnetização DC funciona da seguinte forma: a amostra, magnetizada, é submetida a um movimento oscilatório, paralelo ao eixo do cilindro. As bobinas, chamadas de bobinas de detecção (detection coils +/-, mostradas no desenho), montadas junto ao cilindro, induzem uma força eletromotriz (fem) produzida pelo movimento da amostra. Esse sinal induzido é

proporcional ao momento magnético associado à amostra (variação do fluxo magnético) e à velocidade da amostra durante esse movimento. Portanto, sabendo-se a velocidade de movimentação da amostra, juntamente com o sinal induzido, podemos obter a resposta magnética da amostra.

O nosso interesse é, portanto, obter a curva da magnetização da amostra em função da temperatura. Para esse fim, o equipamento dispõe de software que acompanha tal variação e, programando-se as rotinas desejadas, tais como aumento/diminuição do campo magnético ou temperatura, definimos o número de pontos e o intervalo de medidas, taxa de variação de temperatura, etc. Dessa forma, é possível de se obter tais curvas.

Abaixo seguem algumas fotos do PPMS utilizado no laboratório.

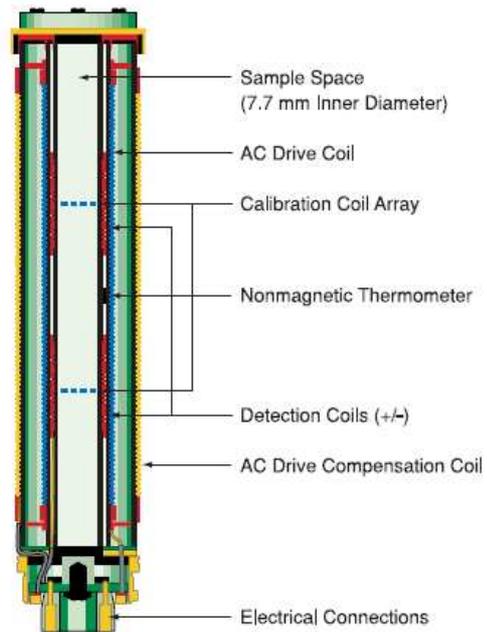


Fig. 2: Esquema do interior do cilindro principal do PPMS: Nota-se as variadas bobinas que existem ao longo do equipamento, para diferentes medidas



Fig. 3: Visão Geral do PPMS no laboratório: O Cilindro a esquerda é um Dewar com Hélio líquido, dentro do qual vai o outro cilindro, mostrado na figura anterior. À direita está o controlador do PPMS, que é o computador central que faz todos os cálculos



Fig. 4: Essa é a chamada “Cabeça” do PPMS. A pequena parte preta mais acima é por onde colocamos a flange com as medidas. Os sensores que existem dentro do cilindro enviam a informação para essa “cabeça”, que por sua vez manda para o computador central.



Fig. 5: Destaque na central do PPMS. É aqui, neste computador, que são feitos os cálculos e é por onde são controlados todos os dados da amostra, como temperatura, campo, posição, etc. É possível também monitorar o nível de hélio no Dewar, e a rotina que o equipamento está realizando.

3. Desenvolvimento das Atividades no Laboratório

3.1. Montagem da Célula e Programa de Aquisição de Dados

Devido ao tamanho das peças que compõem a célula, foi encontrada certa dificuldade em sua modelagem na oficina mecânica. A oficina, embora bem equipada, não possui equipamentos de alta precisão para fabricação de peças muito pequenas e, portanto, tivemos dificuldade em utilizar os primeiros modelos fabricados, pois qualquer desvio do projeto original, por mínimo que fosse, podia implicar na inutilização da célula. Chegamos a montar uma célula com parafusos dos dois lados, um projeto comumente utilizado por outros pesquisadores^{[1][2][4]}, mas aos poucos fomos diminuindo suas dimensões para que o projeto final não ficasse tão robusto.

Com a célula pronta, adaptamos a prensa hidráulica comercial para aplicarmos pressão à célula. Para evitar alguma instabilidade da célula na hora de aplicarmos pressão, foi feita uma base na qual é inserida a célula. Essa base nada mais é do que um pequeno cilindro de aço inox, com 22 mm de altura e 38 mm de diâmetro, com um furo interno de cerca de 7 mm, na qual é inserida a célula. Há também um pequeno furo de 2 mm feito na parte de baixo da base, para que a retirada da célula de sua base seja facilitada. Abaixo seguem fotos do sistema.



Fig. 6: Componentes da célula de pressão em perspectiva. Da esquerda para direita: Cápsula de Teflon, parafuso, pistão, "moeda" de apoio (feita de CuBe, serve para evitar que a cápsula de teflon vaze pelo furo inferior da célula) e cilindro principal.



Fig. 7: Visão de cima dos componentes: Parafuso, cápsula de teflon (tem uma pequena deformação, pois já foi utilizada), cilindro principal (é possível ver o pequeno furo na parte inferior do interior do cilindro), pistão e moeda de apoio.

Nessa célula, é imprescindível que haja um elemento que transmita a pressão aplicada. Nesse caso, trata-se de um óleo mineral (Nujol) que transmite de forma homogênea a pressão por todo o composto. Devemos evitar bolhas de ar quando se insere o óleo mineral, pois isso pode ocasionar problemas na transmissão de pressão. O manômetro de chumbo, inserido juntamente com a amostra é envolvido com uma fina camada de teflon, para evitar alguma confusão entre os dois (manômetro e amostra) na hora de desmontarmos a célula, e também para que fosse deixado um pequeno fio, ligeiramente solto, para facilitar a retirada de ambos da cápsula de teflon.

Com a montagem feita, fazemos uma medida da magnetização em função da temperatura sem a aplicação de pressão. A célula é colocada em um suporte cilíndrico do equipamento PPMS, de forma que coincida com o centro das bobinas, que corresponde à distância de 12,5 cm desde o limite inferior do suporte até a amostra. Essa altura é ajustada simplesmente cortando-se o canudo onde a célula é colocada. Antes de resfriarmos o sistema, fazemos alguns testes preliminares para termos a certeza de que a célula está bem centralizada. Para esse fim, é necessário que verifiquemos o sinal (magnetização) da amostra e certifiquemos que sua posição corresponde à posição central das bobinas. Aplicamos um campo relativamente alto (nesse caso, foi aplicado um campo de 5000 Oe) e determinamos a posição de máximo sinal de magnetização em função da posição da amostra. Após tomarmos todos esses cuidados, programamos as rotinas no programa, que basicamente são:

- Diminuir a temperatura gradativamente até 20K, a 20K/min;
- Diminuir a temperatura até 10K, a 2K/min
- Diminuir a temperatura até 9K, a 1K/min
- Repetir o último passo, para 8k, 7k, 6k, 4k, 3k, 2k sempre esperando a temperatura estabilizar completamente antes de seguir para a próxima temperatura.
- Aumentar o campo magnético (não trabalhamos com campos muito altos, foram utilizados campos até 5000 Oe);
- Iniciar o “scan” de temperatura, no “range” requerido. Esse range varia de acordo com o material que estamos estudando. Normalmente começamos tomando pontos mais espaçados em temperaturas distantes da temperatura de ordenamento do material e mais próximos ao redor dessa temperatura.

Normalmente deixamos o programa no estado de “espera” durante alguns segundos após terminarmos de mudar alguns parâmetros como temperatura ou campo, para garantir estabilidade no sistema.

Todas essas rotinas são tomadas de forma a minimizar o tempo que a amostra fica no aparelho, de forma a não perdermos tempo de trabalho. É claro que, quando estamos lidando com uma amostra desconhecida, devemos ir bem devagar em todos os passos, pois não sabemos onde esperar uma transição, ou saltos típicos. Como no caso das amostras de $\text{EuNi}_2(\text{Si,Ge})_2$ temos uma idéia de onde são as faixas de transição^[5], programamos as rotinas de forma a poupar o máximo de tempo possível.

3.2. Caracterização da Célula: Análise dos Dados

Para uma análise preliminar do funcionamento da célula vamos utilizar o chumbo como manômetro. O motivo de utilizarmos o chumbo se deve principalmente ao fato de que sua magnetização varia fortemente com a pressão aplicada sobre ele. Tendo em vista os dados obtidos por Kamarád, Machátová e Arnold^[3], em seus testes funcionais com células de pressão, sabemos a faixa em que ocorre a transição do chumbo para diferentes pressões e podemos utilizá-los para uma estimativa da pressão aplicada em nossa célula.

Nos testes preliminares da célula obtemos as seguintes curvas para diferentes pressões:

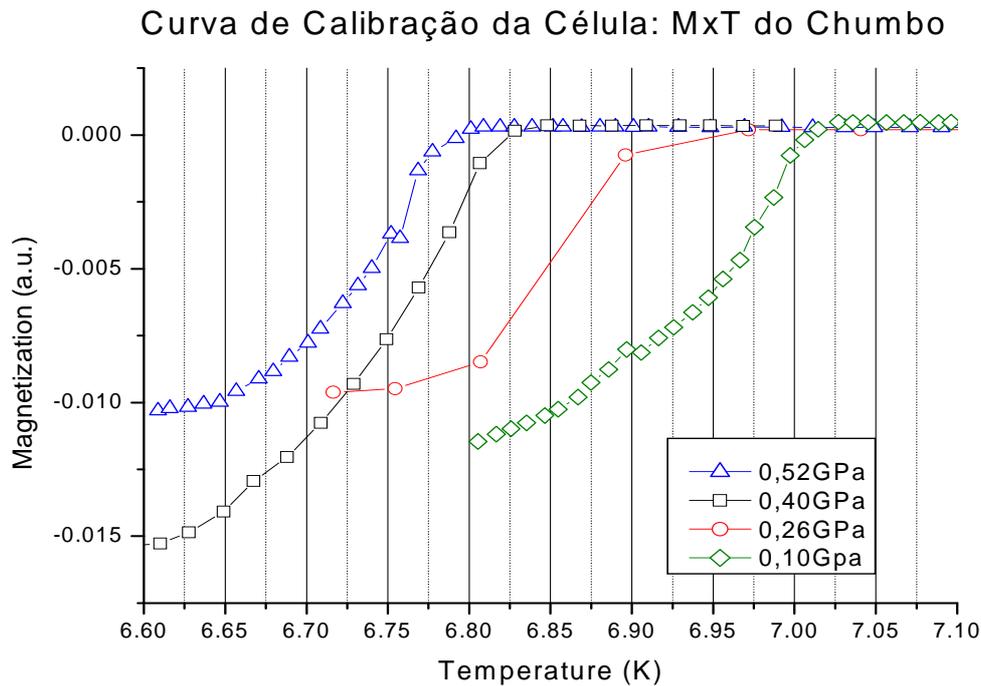


Fig.3: Curva de magnetização do chumbo para diferentes pressões. É notável a dependência da transição do chumbo com a pressão aplicada.

Através do gráfico acima podemos ver claramente a funcionalidade da célula. A transição do chumbo de fato ocorre em temperaturas mais baixas à medida que se aplica pressão no sistema, como era esperado^[3].

Devo salientar que conseguimos esse “range” de pressão mais eficiente ao introduzirmos uma pequena modificação na montagem da célula: colocamos duas buchas de cobre (são, na verdade, feitas a partir de uma folha de cobre, que é cortada com um diâmetro de 3 mm por uma outra peça, desenvolvida especificamente para essa função), uma na parte de baixo da cápsula de teflon, e outra na parte superior, de forma a vedar completamente a célula e evitar que a deformação na cápsula de teflon faça vazar óleo para fora do sistema.

Preparei, pelo método de fusão a arco, duas amostras policristalinas da liga $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$, uma com concentração $x = 0,85$ e outra com $x = 0,7$ (utilizei a mesma notação que H. Wada utilizou em seu artigo^[5], para facilitar a confrontação dos dados).

As medidas do $\text{EuNi}_2\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{1,7}$ ($x=0,85$) foram feitas sob um campo de 5000G num range de temperatura que varia desde 2 até 300 K. Nas figuras 4 e 5 mostradas abaixo temos as curvas de magnetização em função da temperatura para o manômetro de chumbo e para as amostras.

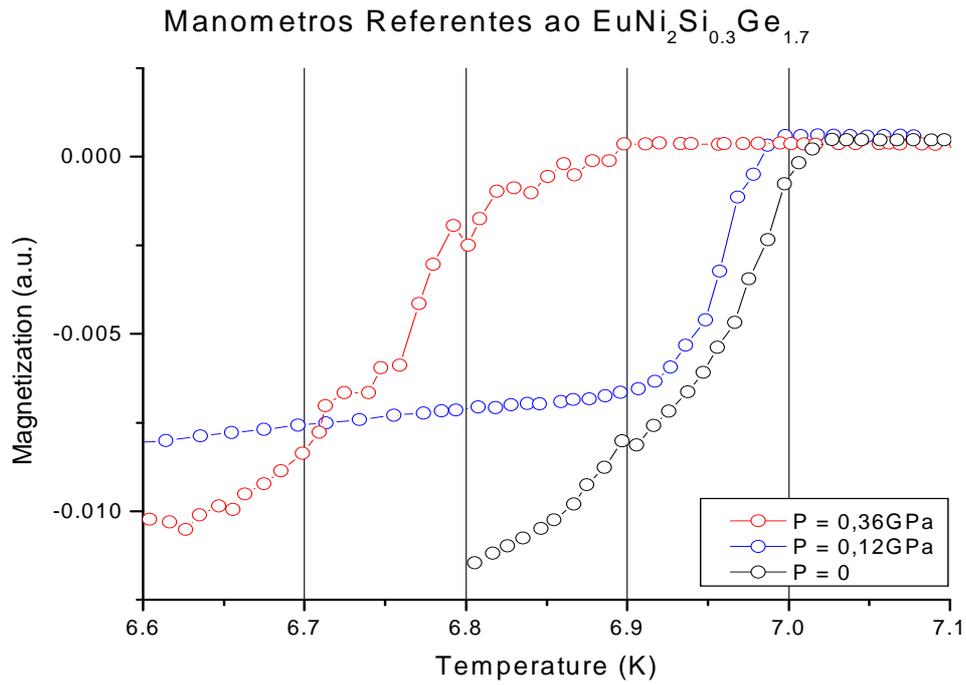


Fig.4: Curva dos manômetros para a amostra com $x=0,85$, e as respectivas pressões.

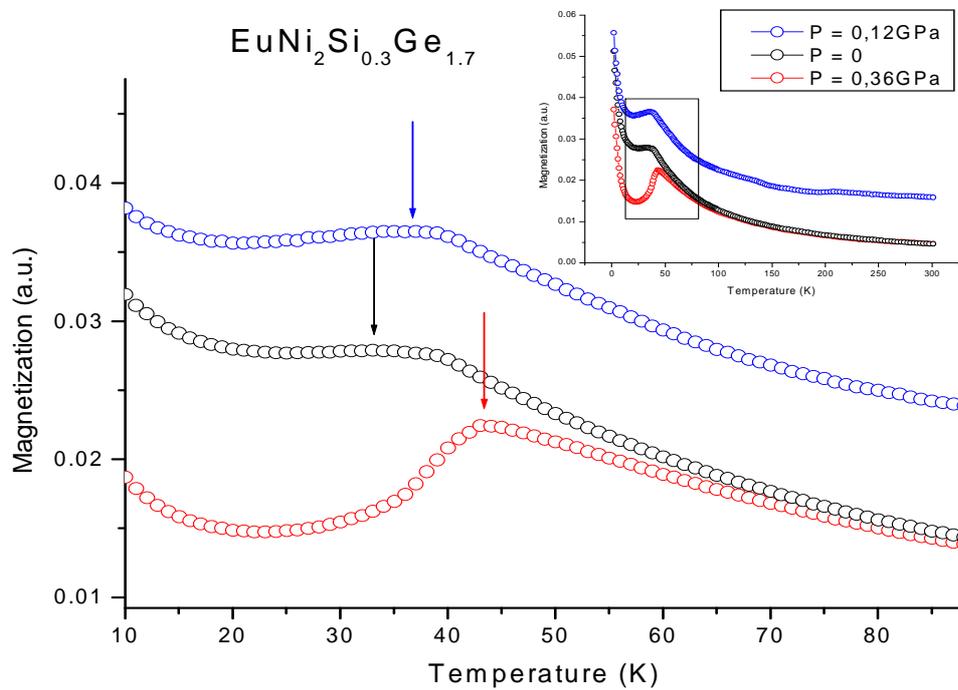


Fig.5: Curva da magnetização do $\text{EuNi}_2\text{Si}_{0.3}\text{Ge}_{1.7}$. As setas indicam uma aproximação do ponto de transição de cada uma das curvas. Nota-se a tendência do aumento da temperatura de transição conforme aplicamos mais pressão. No detalhe temos a curva completa de 2K até 300K.

Pelas curvas de magnetização da amostra, verifica-se claramente a temperatura de transição em torno de 43 K para a pressão aplicada de 0,36 GPa, e em temperaturas mais baixas (~33 e 36 K, respectivamente) nas outras duas. A diferença da intensidade do sinal entre a curva em azul e as demais está no fato de que para essa última utilizamos uma massa maior que a utilizada para as outras duas. Nota-se a mudança do comportamento magnético antes e após a temperatura crítica; a liga tem um comportamento antiferromagnético abaixo dessa temperatura e paramagnético acima dela.

Antes de continuar com a análise mais profunda do comportamento das curvas acima, segue as curvas da amostra com $x=0,7$:

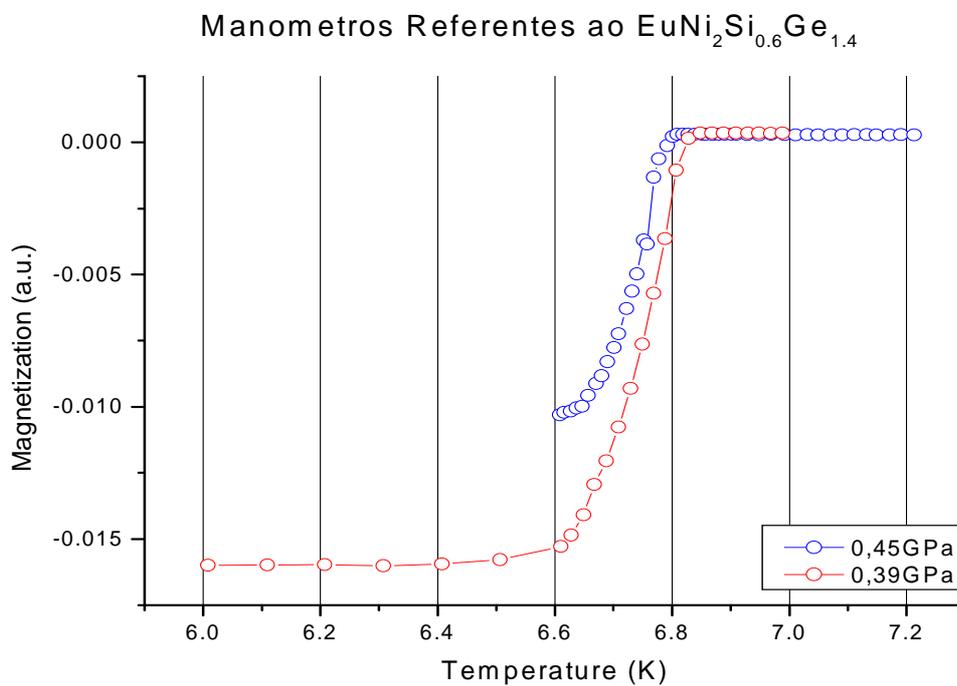


Fig.6: Curva dos manômetros para a amostra com $x=0,7$ e suas respectivas pressões.

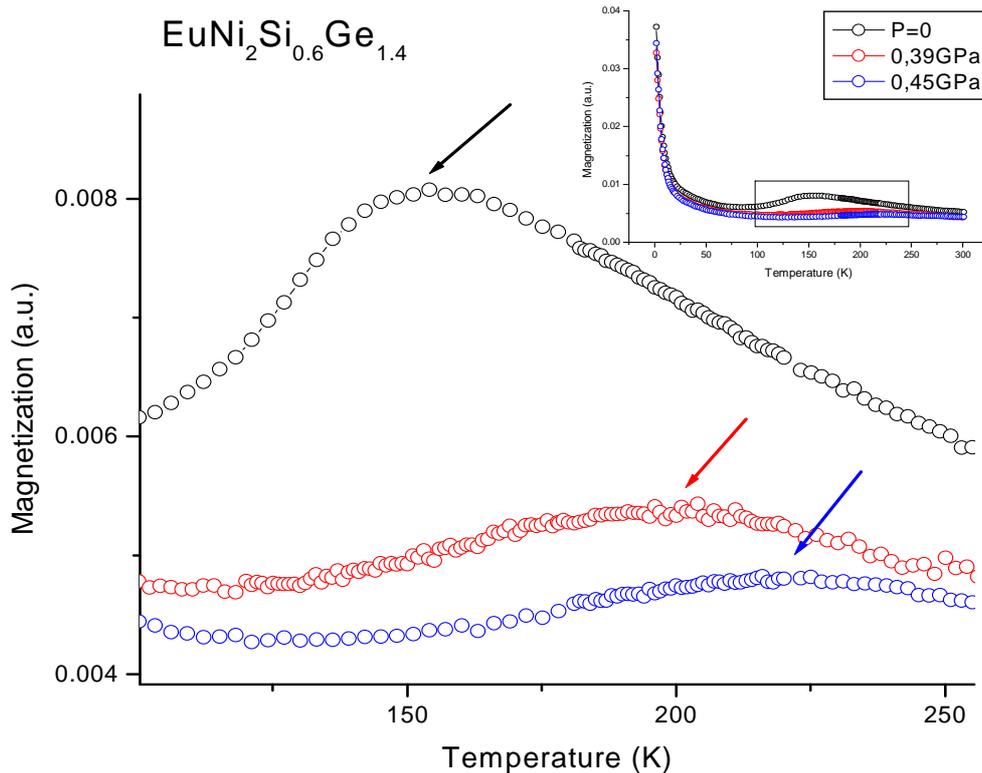


Fig. 7: Curva de magnetização do $\text{EuNi}_2\text{Si}_{0.6}\text{Ge}_{1.4}$. Novamente as setas indicam uma aproximação do ponto de transição de cada uma das curvas. Vemos novamente uma tendência do aumento da temperatura de transição conforme aplicamos pressão. É importante, porém, salientar como o valor das temperaturas de transição se tornaram bem maiores, com relação à amostra com $x=0,85$. No detalhe a curva completa de 2K até 300K

Vemos novamente a tendência que a temperatura de transição tem em aumentar, com o aumento da pressão aplicada sobre a amostra. Para a curva sem pressão temos $T_c \sim 160\text{K}$, para a curva com pressão 0,39GPa, $T_c \sim 200\text{K}$ e para a curva com mais pressão temos $T_c \sim 220\text{K}$. Podemos tentar explicar esse fator ao entendermos melhor como está relacionado o paramagnetismo com o ferromagnetismo.

Toda substância ferromagnética possui um comportamento paramagnético acima da temperatura de transição, também chamada de Temperatura de Curie. A principal característica dos materiais ferromagnéticos é o fato de que os momentos magnéticos de cada átomo interagem fortemente entre si. Essas interações acabam criando o que chamamos de “Domínios de Weiss”, nome dado em homenagem o físico francês Pierre-Ernest Weiss (1865-1940). Weiss propôs a existência desses domínios em 1907, para explicar como certos materiais possuíam uma magnetização sem serem submetidos a um campo magnético exterior. Sabia-se até então que, os chamados materiais paramagnéticos, possuíam átomos que também tinham um momento magnético não nulo, porém, eram aleatoriamente

ordenados, de forma que o momento resultante era nulo, e, logo, apresentando uma magnetização nula sob um campo externo nulo. A explicação que Weiss deu foi que nos materiais ferromagnéticos as interações entre o momento magnético dos átomos acabavam criando certos “domínios” dentro do material, domínios esses que nada mais eram do que certos conjuntos de átomos com momentos magnéticos apontando na mesma direção. Logo, o momento magnético resultante seria a soma do momento desses domínios, e, conseqüentemente, poderia ser não nulo.

O que acontece é que essas interações entre átomos são contrabalançadas com as flutuações térmicas presentes no material, e após certa temperatura, as flutuações tendem a destruir esse ordenamento presente no material, tornando-o paramagnético. É justamente esse ponto que estamos vendo nas curvas mostradas, e a temperatura crítica mostrada é justamente a temperatura de Curie. Através dessa explicação, uma possível justificativa para o aumento da temperatura de transição com a pressão é o fato de que ao aumentarmos a pressão, estamos favorecendo as interações magnéticas presentes nos átomos, aumentando o termo de energia associada ao acoplamento dos spins. Por isso precisamos de uma temperatura maior, ou seja, maior flutuação térmica, para haver o desordenamento magnético, e conseqüentemente a mudança de ferromagneto para paramagneto.

Outra característica notável é como as diferentes concentrações de Si e Ge alteram a temperatura crítica do material. Vemos que para $x = 0,7$ a temperatura de transição é bem maior do que o caso com $x = 0,85$. Isso pode ter uma explicação análoga ao efeito da pressão hidrostática causado pela célula: provavelmente uma dopagem maior de silício na amostra age como um efeito mais drástico de pressão sobre o material, alterando seus parâmetros estruturais. Não foi feita uma análise de raio-x sobre os parâmetros cristalinos das amostras até a presente data, para verificarmos os parâmetros estruturais, mas pretendemos fazê-lo em breve.

4. Conclusão

Podemos concluir que o projeto foi um sucesso. Foi possível aliar um protótipo de extrema utilidade nas atividades de laboratório, que servirá para muitos outros testes e medidas, ao mesmo tempo em que nos ajudou com o estudo da liga $\text{EuNi}_2(\text{Si,Ge})_2$. Estudo esse que nos mostrou certas características muito peculiares das transições magnéticas, assim como a importante relação entre a dopagem de Si com o efeito de pressão sobre o material. Confrontando os dados obtidos por

nós com os dados obtidos por H. Wada^{[5][6]}, temos total concordância nas curvas apresentadas. No seu artigo o autor não menciona a massa de amostra usada em suas medidas, no entanto, é provável que tenha utilizado uma massa maior em suas medidas, que resultaram em um sinal mais intenso, mas mesmo com um sinal menos intenso fomos capazes de observar qualitativamente curvas similares.

Como é do interesse do nosso grupo, ainda obteremos mais dados sobre outras concentrações da liga estudada, para termos uma maior quantidade de dados que nos possibilite verificarmos com mais solidez a eficiência da célula. Faremos algumas análises de Raios-x para sustentar as afirmações presentes nesse estudo. Seguiremos ainda tentando construir a célula para medidas de calorimetria, mas esse é outro ramo de estudo, e levará mais algum tempo para ser abordado.

5. Referencias

[1] R. A. Sadykiv, N. S. Bezaeva, A. I. Kharkovskiy, P. Rochette, J. Gattacceca, V. I. Trukhin - Review of scientific instruments vol.79 – Nonmagnetic high pressure cell for magnetic remanence measurements up to 1.5GPa in a superconducting quantum interference device magnetometer, 2008; - Artigo que possui dados úteis sobre a escolha de materiais adequados para construção de células de pressão para medidas magnéticas.

[2] Y. Uwatoko, S. Todo, K. Ueda, A. Uchida, M. Kosaka, N. Mori, T. Matsumoto – Journal of Physics: Condensed Matter – Material properties of Ni-Cr-Al alloy and design of a 4GPa class non-magnetic high-pressure cell, 2002; - Utilizei alguns dados sobre a liga Cobre-Berílio encontradas neste artigo. Foi nele também que eu encontrei a primeira referência sobre a liga NiCrAl, um material promissor para construção de células de pressão.

[3] J. Kamarád, Z. Machátová e Z. Arnold – Review of Scientific Instruments – Vol. 75, Number 11 – High pressure cells for magnetic measurements – Destruction and functional tests, 2004; - Encontrei neste artigo informações interessantes sobre testes de resistência de células de pressão, que forma muito úteis na concepção da nossa célula. Há bons resultados sobre a transição do Chumbo, muito utilizado como manômetro para essas células.

[4] I. R. Walker - Review of Scientific Instruments, vol.70 nº8 – Nonmagnetic piston-cylinder pressure cell for use at 35kbar and above, 1999; - Artigo muito informativo sobre as características das principais ligas utilizadas para construção de células de pressão: CuBe, NiCrAl e CoNi Alloy MP35N.

[5] H. Wada, M.F. Hundley, R Movshovich e J.D. Thompson – Physical Review B – Vol. 59, Number 2 – Pressure Effect on the Valence Transition of $\text{EuNi}_2(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_2$, 1999 – Breve, mas informativo, artigo sobre o efeito da pressão na transição de Valência do $\text{EuNi}_2(\text{Si,Ge})_2$. Foi utilizado para confrontar alguns dados experimentais que nós obtemos.

[6] H. Wada, A. Nakamura, A. Mitsuda, M. Shiga, T. Tanaka, H. Mitamura e T. Goto – Journal of Physics: Condensed Matter – Temperature- and field- induced valence transitions of $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$, 1997; - Principal referência desse trabalho, foi o artigo que inicialmente instigou nosso grupo a realizar alguns experimentos com a liga $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$. Possui bons resultados sobre a transição de valência do Eu, assim como sobra as temperaturas de transição da liga sobre variadas pressões.

[7] Z. Hossain, Th. Srässle, C. Geibel, A. Furrer – Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 272-276 – 2352 - 2354 – First-order valence transition and barocaloric effect in $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$, 2004

[8] T.F. Smith. C.W. Chu e M.B. Maple – Cryogenics – Superconductin Manometers for high pressure measurement at low temperature, 1969 – Artigo de onde foi calculada a equação para a variação da pressão com a temperatura de transição do chumbo.

[9] A. Amikam – Introduction to the Theory of Ferromagnetism – Oxford Editor – Claredon, 1996

[10] S. Chikazumi – Physics of Ferromagnetism – 2nd Edition, Oxford Editor – Claredon, 1997 – As Ref.9 e 10 foram dois livros que utilizei para compreender melhor a teoria do ferromagnetismo.

6. Comentários e Opiniões do Orientador

O José realizou um ótimo trabalho desenvolvendo as células de pressão. O equipamento em questão tem espaço reduzido para este tipo de aplicação e esta célula é muito versátil para obtenção de curvas de magnetização sob pressão no PPMS. No caso de materiais com forte magnetização, sistemas ordenados, este estudo pode ser realizado agora no PPMS graças a esta célula. No passado, só o uso do SQUID permitia a obtenção deste tipo de dados. O próximo passo, de grande importância, é a adaptação de uma célula para o calorímetro. Medidas de calorimetria sob pressão são por si muito difíceis, mas acreditamos poder realizá-las mesmo em materiais ordenados com uma nova versão de calorímetro que utiliza elementos Peltier. Se bem sucedido, o trabalho do José será pioneiro a nível Nacional, pelo que me é dado saber.