

**Mariella Alzamora Camarena**

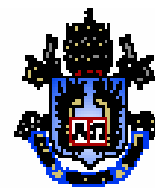
**Antiferromagnetismo e ponto crítico quântico  
no composto  $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$  sob pressão**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Física da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Hortencio Alves Borges  
Co-Orientador: Prof. Magda Bittencourt Fontes

Rio de Janeiro  
setembro de 2007



**Mariella Alzamora Camarena**

**Antiferromagnetismo e ponto crítico quântico  
no composto  $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$  sob pressão**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Física da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Hortencio Alves Borges**  
Orientador – PUC-Rio

**Prof. Magda Fontes Bittencourt**  
Co-orientador - CBPF

**Prof. Elisa Maria Baggio Saitovitch**  
CBPF

**Prof. Welles Antonio Martinez Morgado**  
PUC-Rio

**Prof. Mucio Amado Continentino**  
UFF

**Prof. Renato Bastos Guimarães**  
CBPF

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de setembro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Mariella Alzamora Camarena**

Bacharel em Física pela Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima - Perú. Mestre em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, na área de supercondutividade e magnetismo.

#### Ficha Catalográfica

Alzamora Camarena, Mariella

Antiferromagnetismo e ponto crítico quântico no composto  $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$  sob pressão / Mariella Alzamora Camarena; orientador: Hortencio Alves Borges ; co-orientadora: Magda Bittencourt Fontes. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Física, 2007.

v., 138f: il.; 29,7 cm.

Tese de doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Teses. 2. Antiferromagnetismo. 3. Ponto crítico quântico. 4. Férmion pesado. I. Borges, Hortencio Alves. II. Fontes, Magda Bittencourt. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. IV. Título.

CDD: 530.

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes na minha vida, meus pais:  
Alfredo e Maria.

## **Agradecimentos**

Este espaço é dedicado àqueles que cooperaram para a concretização desse importante passo na minha formação profissional e àqueles que tornaram esse período da minha vida também enriquecedor do ponto de vista pessoal. Agradeço

A meu orientador Professor Hortêncio Borges pelo incentivo, simpatia e presteza no auxílio nas atividades e discussões sobre o desenvolvimento deste trabalho.

A minha orientadora Professora Magda Bittencourt Fontes pelo apoio e dedicação na orientação deste trabalho.

A Professora Elisa M. Baggio-Saitovitch, pela paciência, apoio e incentivo, e também pelas valiosas contribuições neste trabalho.

A os doutores Julio, Eduardo e Scheilla pelos valiosos ensinamentos e frutíferas discussões desenvolvidas durante o dia a dia do laboratório. Agradeço a Scheilla também pela ajuda na redação desta tese sem a qual este trabalho não teria a mesma qualidade.

Aos técnicos Henrique, Walmir, Ivanildo e Vicente por manterem o laboratório funcionando

Aos funcionários do departamento Giza e Julinho, pelas orientações e ajuda e também aos funcionários do CBPF: Vanda e Ronaldo que sempre me ajudaram.

A turma do vôlei dos sábados, família Xing, Alex, Flora, Vanji, Jacky, William

A minha família pelo apoio constante que me brindaram durante tantos anos de estudo, por seu carinho e sua compreensão. A Dalber quem me acompanhou e me ajudou neste recorrido.

À CAPES e ao CLAF pelo apoio financeiro, à PUC-Rio e ao CBPF pela oportunidade concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

## Resumo

Camarena, Mariella Alzamora; Borges, Hortencio Alves; Fontes, Magda Bittencourt. **Antiferromagnetismo e ponto crítico quântico no composto  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$  sob pressão.** Rio de Janeiro, 2007. 138p. Tese de Doutorado - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Estudos no sistema pseudoternário  $CeCoGe_{3-x}Si_x$  (com  $0 \leq x \leq 3$ ) mostraram que o sistema evolui continuamente de um estado antiferromagnético da rede de Kondo ( $CeCoGe_3$  com  $\sim 21 K$ ) para um composto de valência intermediária ( $CeCoSi_3$  com  $T_{FV} \sim 230 K$ ). O sistema apresenta comportamento tipo não-líquido de Fermi (NLF) em torno do ponto crítico quântico (PCQ) na concentração crítica  $x_C \approx 1,25$ . A substituição isoeletrônica dos átomos de  $Ge$  por  $Si$  não aumenta o grau de desordem magnética, sendo ideal para o estudo de efeitos intrínsecos das variações das constantes de interação da rede Kondo. Estudamos este sistema em concentrações próximas à concentração crítica através de medidas de resistividade elétrica AC sob pressão ( $x = 0,9$ ) e campo magnético ( $x = 1$ ), em amostras policristalinas. Nossos resultados mostram que a ordem magnética de longo alcance presente na amostra  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$  é suprimida com o aumento da pressão e, para a pressão crítica  $P_C \approx 6,2 kbar$ ,  $T_N \rightarrow 0$ . Para temperaturas inferiores a  $T_N$ , as medidas de resistividade são bem descritas considerando um espalhamento de elétrons de condução por mágnons antiferromagnéticos anisotrópicos. Acima de  $P_C$  observa-se a recuperação do comportamento líquido de Fermi. Na região crítica o estado NLF com expoentes próximos a 1 foi observado. A análise do comportamento da linha crítica na proximidade do PCQ indica que as flutuações magnéticas relevantes são tipicamente bidimensionais. Por outro lado, no composto  $CeCoGe_2Si_1$ , que apresenta ordem magnética de curto alcance com  $T_N \approx 2 K$ , observa-se que a temperatura de ordenamento é reduzida com o aumento do campo magnético, e para campos acima de  $3 T$  surge o comportamento tipo líquido de Fermi.

## Palavras-chave

Antiferromagnetismo, ponto crítico quântico, férmion pesado.

## Abstract

Camarena, Mariella Alzamora; Borges, Hortencio Alves; Fontes, Magda Bittencourt. **Antiferromagnetism and quantum critical point in  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$  compound under pressure.** Rio de Janeiro, 2007. 138p. PhD thesis - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Studies on the pseudo ternary system  $CeCoGe_{3-x}Si_x$  (where  $0 \leq x \leq 3$ ) have shown that the system evolves continuously from a Kondo lattice antiferromagnetic state ( $CeCoGe_3$  with  $T_N \sim 21 K$ ) towards a mixed valent compound ( $CeCoSi_3$  with  $T_{FV} \sim 230 K$ ). The system displays a non-Fermi-liquid-type behavior (NFL) in the vicinity of the quantum critical point (QCP) at the critical concentration  $x_C \approx 1.25$ . Isoelectronic substitution of  $Si$  atoms for  $Ge$  does not enhance the degree of magnetic disorder, rendering it ideal for the study of the Kondo lattice's interaction constants intrinsic effects. We have studied this system in polycrystalline samples at concentrations close to the critical one through AC electrical resistivity under pressure ( $x = 0.9$ ) and magnetic field ( $x = 1$ ) measurements. Our results show that the long range magnetic order present in the  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$  sample is suppressed as pressure is increased, and that for the critical pressure  $P_C \approx 6.2 kbar$ ,  $T_N \rightarrow 0$ . For temperatures below  $T_N$ , the resistivity data are well described considering conduction electron scattering by anisotropic antiferromagnetic magnons. Above  $P_C$  we observe the Fermi liquid behavior. At the critical region, a NFL state with exponents close to 1 was found. The analysis of the behavior of the critical line in the neighborhood of the QCP indicates that the relevant magnetic fluctuations are typically two-dimensional. On the other hand, the  $CeCoGe_2Si_1$  compound displays short range order ( $T_N \approx 2 K$ ). The ordering temperature is reduced under an increase of an applied magnetic field, and for magnetic fields above  $3T$  a Fermi liquid behavior arises.

## Keywords

Antiferromagnetism, quantum critical point, heavy fermion.

## Sumário

1 Introdução	18
2 Aspectos teóricos	24
2.1. O efeito Kondo	24
2.2. Rede Kondo	26
2.3. Transições de fase quântica e leis de escala.	29
2.4. Os férmions pesados	33
2.5. Modelo de fases de Griffith	37
2.6. Ondas de spin em um antiferromagneto anisotrópico	39
3 Compostos de cério	41
3.1. O composto CeCoGe <sub>3</sub>	46
3.2. O composto CeCoSi <sub>3</sub>	60
3.3. O sistema CeCoGe <sub>3-x</sub> Si <sub>x</sub>	62
3.3.1. Região Antiferromagnética ( $0 \leq x < 1,0$ )	63
3.3.2. Região crítica ( $1,0 \leq x \leq 1,5$ )	67
3.3.3. Região de valência intermediária ( $1,5 < x \leq 3$ )	74
4 Os métodos experimentais	77
4.1. Preparação das amostras	77
4.2. Teste de qualidade das amostras	81
4.3. Resistividade AC	82
4.3.1. Contatos elétricos e instalação no porta-amostra	82
4.3.2. Sistema de aquisição de dados	83
4.4. Baixas temperaturas	85
4.4.1. Os criostatos.	87
4.4.2. Sistema de Refrigeração <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	89
4.5. Células de pressão	93



5 Resultados e discussões	96
5.1. Caracterização	96
5.1.1. Raios-x	96
5.1.2. Medidas de magnetização	100
5.1.3. Medidas de resistividade elétrica à pressão ambiente	101
5.2. Resistividade elétrica sob pressão no composto $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$	106
5.2.1. Fase magnética ( $0 \leq P \leq 6,2$ kbar)	106
5.2.2. Ondas de spin em um AF anisotrópico ( $0 \leq P \leq 6,2$ kbar)	109
5.2.3. Fase não-magnética ( $6,7 \leq P \leq 10,2$ kbar)	114
5.2.4. Região não-Líquido de Fermi ( $5,5 \leq P \leq 8,2$ kbar)	117
5.2.5. Resistividade Residual ( $0 \leq P \leq 10,2$ kbar)	118
5.2.6. $T_{\text{max}}$ ( $0 \leq P \leq 10,2$ kbar)	120
5.2.7. Diagrama de fase do $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$	122
5.3. Composto $\text{CeCoGe}_{2,25}\text{Si}_{0,75}$	123
5.4. Resistividade elétrica sob campo magnético no $\text{CeCoGe}_2\text{Si}_1$	125
6 Conclusões e perspectivas	130
Refêrencias	133

## Lista de figuras

- Figura 1.1 temperatura de ordem magnética em função da concentração de silício, para  $x < 0,75$  o sistema apresenta duas transições (ferromagnética e antiferromagnética), para  $x = 0,75$  uma única transição antiferromagnética e para  $x = 1,25$  a temperatura de ordem tende a zero. As temperaturas Kondo, obtidas de medidas de calor específico, aumentam com a concentração de silício acima da concentração crítica [10]. 22
- Figura 2.1. Esquema do processo de blindagem do spin da impureza magnética (em preto) pela nuvem de elétrons de condução (em cinza), os elétrons de condução não se encontram localizados, simplesmente a meia vida deles na região da impureza aumenta devido ao espalhamento ressonante. 25
- Figura 2.2. Resistividade elétrica para um metal não magnético, para um metal com impureza magnética e para o modelo Kondo. 25
- Figura 2.3. Dependência da magnitude  $T_K$  da interação de Kondo e da magnitude  $T_{RKKY}$  da interação RKKY com parâmetro  $J/W$ . 27
- Figura 2.4. Diagrama de fases magnético predito por teoria de flutuações de spin. Na região I, propriedades LF podem ser observadas, na região II e III, comportamento NLF podem ser encontrados. 31
- Figura 2.5. Diagrama esquemático dos férmions pesados, proposto por Continentino [21], mostrando a linha de coerencia ( $T_{coh}$ ), a linha crítica magnética ( $T_N$ ) e a trajetória não-líquido de Fermi (NLF) em temperaturas finitas acima do PCQ. No diagrama  $g = J/W - (J/W)_C$ , e mede a distancia ao ponto crítico. 35
- Figura 2.6. Diagrama de fluxo para a rede Kondo. Quando um material é levado a um valor crítico de  $T_K/T_{RKKY}$ , este é forçado atravessar o PCQ. Os pontos fixos AF e LF são ligados por um novo ponto fixo instável [23]. 36
- Figura 2.7. Diagrama de Fase para o modelo de fase de Griffith, onde  $\delta$

representa o parâmetro de controle, como concentração ou pressão.	38
Figura 3.1. Diagramas esquemáticos da variação da energia de alguns orbitais em função do número atômico (a) e da densidade de estados do Ce (b) [27].	41
Figura 3.2. Diagrama de fase (T-P) do Ce metálico [28].	42
Figura 3.3. Estruturas cristalinas do BaNiSn <sub>3</sub> (a), e ThCr <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> (b) [39].	44
Figura 3.4. Calor específico de CeCoGe <sub>3</sub> (à esquerda) e resistência elétrica (à direita) em função da temperatura para amostras policristalinas de grão alinhado [35].	46
Figura 3.5. Susceptibilidade magnética com campo paralelo (□) e perpendicular (+) ao eixo <i>c</i> para a amostra policristalina CeCoGe <sub>3</sub> de grão alinhado [35].	47
Figura 3.6. Magnetização de CeCoGe <sub>3</sub> com H//[001]. a) depois do resfriamento a campo nulo, b) medido diminuindo a temperatura com campo aplicado, c) resfriado com campo e medido com aumento da temperatura e d) igual que c) mas com o campo desligado. A curva e) corresponde a magnetização com H ⊥ [001], resfriado com campo e medido com aumento da temperatura [35].	48
Figura 3.7. Magnetização do CeCoGe <sub>3</sub> em função da temperatura para campos magnéticos altos com o campo magnético paralelo ao eixo <i>c</i> [35].	49
Figura 3.8. Isotermas de magnetização de CeCoGe <sub>3</sub> em 3K, 15K e 19K para H//[001] e em 15K para H⊥[001].	50
Figura 3.9. Diagrama de fases para o CeCoGe <sub>3</sub> [35].	51
Figura 3.10. Resistividade elétrica de CeCoGe <sub>3</sub> para baixas temperaturas. As setas correspondem a transições antiferromagnéticas [41].	52
Figura 3.11.a) Curvas de magnetização para H//[001] em diferentes temperaturas. b) susceptibilidade magnética em baixas temperaturas de 5K até 30K com os campos magnéticos em duas diferentes direções [41].	52
Figura 3.12. Magnetização em 2 K para H//[001] e [100], isotermas de magnetização em CeCoGe <sub>3</sub> para H//[001] para diferentes temperaturas [41].	53

- Figura 3.13. Diagrama de fase magnético de  $\text{CeCoGe}_3$  [41]. 54
- Figura 3.14. Curva de magnetização para  $H//[001]$  em 2 K. as linhas sólidas representam um processo de magnetização em 0 K [41]. 55
- Figura 3.15. Calor específico de  $\text{CeCoGe}_3$  monocristal em baixas temperaturas [41]. 55
- Figura 3.16. Inverso da susceptibilidade magnética de  $\text{CeCoGe}_3$  [41]. 56
- Figura 3.17. Parte magnética da resistividade em função da temperatura [41]. 56
- Figura 3.18. a) Contribuição da parte magnética do calor específico e b) entropia magnética de  $\text{CeCoGe}_3$ . A linha sólida em a) é o resultado de cálculos de CEC [41]. 58
- Figura 3.19. Inverso da susceptibilidade magnética de  $\text{CeCoGe}_3$ . As linhas sólidas são o resultado de cálculos de CEC [41]. 59
- Figura 3.20. Medidas de resistividade em função da temperatura para  $\text{CeCoSi}_3$ , o *inset* mostra a transição supercondutora [32]. 60
- Figura 3.21. Inverso da susceptibilidade para  $\text{CeCoSi}_3$  (símbolo) e o ajuste com mínimos quadrados (linha sólida) [30]. 61
- Figura 3.22. Parâmetros de rede  $a$ ,  $c$  e o volume  $V$  da célula unitária à temperatura ambiente em função da concentração  $x$  de silício para  $\text{CeCoGe}_{3-x}\text{Si}_x$  [10]. 63
- Figura 3.23. Magnetização em função da temperatura para três campos magnéticos diferentes nos compostos com  $x=0$  (a) e  $x=0.5$  (b). Os *insets* mostram as anomalias para baixos campos [10] 65
- Figura 3.24. Curvas de  $C/T$  Vs  $T$  para  $x= 0; 0,5; 0.75; e 0,9$  mostrando ordem antiferromagnética, para as duas primeiras concentrações são observada um pico maior e outro mais pequeno [10]. 66
- Figura 3.25. Do lado direito, curvas de resistência em baixas temperaturas para  $\text{CeCoGe}_{2,25}\text{Si}_{0,75}$  em diferentes pressões. a linha corresponde ao ajuste considerando espalhamento elétron-mágnons. Do lado esquerdo, parâmetros obtidos dos ajustes a linha sólida representa o calculo teórico de  $T_N$  considerando um modelo de flutuações bidimensionais (ver ref. [12]), 67
- Figura 3.26.  $C/T$  vs  $T$  para  $x=1,0; 1,1; 1,25; e 1,5$ , mostrando

- comportamento não-líquido de Fermi. O *inset* mostra os valores de  $\gamma$  para  $T=0.5$  K em função da concentração de Si. 68
- Figura 3.27. Variação térmica da inversa da susceptibilidade magnética para compostos não-magnéticos com  $x \geq 1$  [10] 69
- Figura 3.28. Espectro  $\mu^+$ SR de  $\text{CeCoGe}_{1,9}\text{Si}_{1,1}$  para diferentes temperaturas (do lado esquerdo). Funções de assimetria  $A_1$  e  $A_2$  e as razões de relaxação do spin do muon  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  medidos para dois sítios do muon (do lado direito) [54]. 72
- Figura 3.29. Razão de relaxação do spin dos múons em campo zero para os dois sítios [56]. 74
- Figura 3.30. Curvas de  $C/T$  Vs  $T$  para  $x = 1,5; 2,0; 2,25; \text{ e } 3,0$  [10]. 75
- Figura 3.31.  $T_N$  ( $\bullet$ ),  $\theta_W$  ( $\blacklozenge$ ) e  $T_K$  estimado para  $\text{CeCoGe}_{3-x}\text{Si}_x$  em função da concentração de silício  $x$ . Círculos abertos ( $\circ$ ) denotam a temperatura de ordenamento de curto alcance obtida por medidas de susceptibilidade [10]. 76
- Figura 4.1. Fotos do forno arco do CBPF empregado na fusão dos elementos. 78
- Figura 4.2. Ciclo de tratamento térmico na preparação das amostras  $\text{CeCoGe}_{3-x}\text{Si}_x$ . Na parte interior pode-se observar a fotografia de uma amostra após o tratamento térmico. 79
- Figura 4.3. Exemplo de um difratograma de raios-x de uma amostra sem (a) e com fases espúrias (b). 81
- Figura 4.4. Configuração convencional dos contatos para o cálculo da resistividade em uma amostra poliedral. No gráfico I e V representam os fios de corrente e voltagem respectivamente. 82
- Figura 4.5. Diagrama de blocos do sistema usado nas medidas de resistividade AC sob pressão. 84
- Figura 4.6. Diagrama de fases de uma mistura  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$ . 86
- Figura 4.7. Criostato Jannis empregado nas medidas de resistividade com a haste e o porta-amostras. 88
- Figura 4.8. Criostato Oxford empregado nas medidas de resistividade em baixas temperaturas com campo magnético aplicado, na parte central do reservatório de He líquido será colocado o *insert*. 89

- Figura 4.9. diagrama esquemático da câmara de isolamento do sistema de refrigeração  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , *insert*, empregado nas medidas de resistividade em baixas temperaturas. 90
- Figura 4.10. Figura esquemática das componentes de um refrigerador de diluição  $^3\text{He}/^4\text{He}$  e fotografia do *insert* do sistema de refrigerador do CBPF 91
- Figura 4.11. Painel de controle do sistema de bombeamento. 92
- Figura 4.12. Representação esquemática da célula de pressão líquida utilizada no presente trabalho. 94
- Figura 4.13. Porta amostra colada na rolha, a) observa-se o fio de manganina enrolada, b) instalação de amostras c) instalação do chumbo do outro lado do porta-amostras. 94
- Figura 4.14. Exemplo da obtenção da  $T_C$  do chumbo para determinar a pressão. 95
- Figura 5.1. Refinamento pelo método de Rietveld para os dados de difração de raios-x da amostra  $\text{CeCoGe}_3$  à temperatura ambiente. Os pontos correspondem aos dados experimentais, a linha contínua ao ajuste teórico, e as barras verticais às linhas de Bragg. Na parte superior é mostrada a estrutura cristalina deste composto. 97
- Figura 5.2. Variação dos parâmetros de rede e do volume em função da concentração  $x$  de Si. As linhas tracejadas são um guia para os olhos. 99
- Figura 5.3. M/H para baixas temperaturas. As setas indicam as transições magnéticas. 100
- Figura 5.4. Inverso das medidas de M/H(T) para: a)  $\text{CeCoGe}_3$  e b)  $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$ . 101
- Figura 5.5. Medidas de resistividade para amostras com  $x(\text{Si}) = 0$  e  $0,9$ . Os insets são uma ampliação na região de baixa temperatura, onde  $T_N$  é observada. 101
- Figura 5.6.a) Medidas de resistividade para as amostras  $\text{LaCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$  ( $\nabla$ ) e  $\text{CoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$  ( $\bullet$ ) e a contribuição magnética,  $\rho_m$ , para  $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$ . Na figura b) observa-se  $\rho_m(T)$  no intervalo de altas temperaturas onde encontra-se  $T_{\text{max}} \propto T_K$ . 103
- Figura 5.7. Determinação do  $T_N$  a partir do mínimo da segunda derivada

- dos dados de resistividade da amostra  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$ . 103
- Figura 5.8. Exemplo da estimativa de  $\rho_0$  para a amostra com  $x=0,9$ . 105
- Figura 5.9. Medidas de resistividade sob pressão para a amostra  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$ . As setas indicam a temperatura de transição magnética 107
- Figura 5.10. Variação de  $T_N$  em função da pressão. A linha sólida representa o ajuste com a Eq. 5.3, obtendo uma pressão crítica de 6,18(2) kbar. 108
- Figura 5.11. Curvas de resistividade em baixas temperaturas para diferentes pressões. As linhas sólidas representam o ajuste considerando a Eq.  $K_B T < \Delta$  (ver texto) [69]. 111
- Figura 5.12. O gap e a quantidade  $A \propto 1/D^3$ , comparadas com a variação de  $T_N$ . Acima de 4,5kbar observa-se uma correlação entre  $\Delta(P)$  e  $T_N(P)$ : a linha representa o ajuste de  $\Delta(P)$  levando a uma pressão crítica igual a 6,19 kbar [69]. 112
- Figura 5.13. Linha crítica obtida através de ajuste de  $T_N(P)$  com a Eq. 5.6 para pressões acima de 5 kbar, onde o gap ( $\blacktriangle$ ) e  $T_N$  (o) caem mais rapidamente para zero. A linha tracejada representa uma simulação de  $T_N$  com a expressão para um sistema 3D [69]. 114
- Figura 5.14.a)  $\rho(T)$  em símbolos abertos e o ajuste com  $\rho(T)=\rho_0+CT^n$ , obtendo para todas as pressões apresentadas  $n=2$ . b) Aplicação do método da horizontal:  $(\rho(T)-\rho_0)/T^n$  para nossos dados, a linha preta representa o intervalo de temperatura para o qual o expoente  $n=2$  é válido. 116
- Figura 5.15. Variação de  $T_{cross}$  e  $C$  em função da pressão, as linhas representam os ajustes (ver texto) [69]. 117
- Figura 5.16. Método da horizontal para pressões próximas à pressão crítica. 118
- Figura 5.17. Resistividade residual para vários sistemas férmions pesados apresentando comportamentos diferentes. Os picos vistos acima da pressão crítica estão associados a mudanças de valência [80]. 119
- Figura 5.18.a) Medidas de resistividade para diferentes pressões como função da temperatura (apresentada em escala logarítmica). b) Valores obtidos de  $\rho_0$  para  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$  [69]. 120
- Figura 5.19. Resistividade magnética  $\rho_m$  da amostra  $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$  como

- uma função da Temperatura (em escala Logaritmica) para diferentes pressões. As setas indicam a temperatura onde  $\rho_m$  é máxima [69]. 121
- Figura 5.20.  $T_{\max}$  obtida da parte magnética da resistividade em função da pressão [69]. 121
- Figura 5.21. Diagrama de fases  $P \times T$  para amostra  $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$ . A linha sólida representa o ajuste com modelo de ondas de spin para um sistema bidimensional, a linha tracejada corresponde ao ajuste de campo médio e as linhas pontilhadas delimitam a região não-liquido de Fermi [69]. 122
- Figura 5.22. Temperatura de Néel em função da pressão para o sistema  $\text{CeCoGe}_{2,25}\text{Si}_{0,75}$ . Os símbolos abertos representam  $T_N$  obtidas de medidas de resistência e susceptibilidade em função da pressão. Os círculos cheios representam  $T_N$  por nos obtidos para a amostra  $\text{CeCoGe}_{2,1}\text{Si}_{0,9}$ . 124
- Figura 5.23.  $C/T$  vs.  $\ln T$  e susceptibilidade magnética AC [83, 84]. 125
- Figura 5.24. Medida de resistividade elétrica para nossa amostra com  $x=1$  com campos magnéticos inferiores a 2 T. As setas representam a temperatura de ordenamento ( $T_N$ ). 126
- Figura 5.25. Medida de resistividade elétrica para  $H=3,5$  T. observa-se uma dependência linear entre 0,5 e 2,8 K. 126
- Figura 5.26. Medida de resistividade elétrica para  $H \geq 3,5$  T. as linhas sólidas representam um ajuste linear que representa a dependência quadrática da resistência com a temperatura. 127
- Figura 5.27. Temperatura de ordem e coerência em função do campo magnético aplicado. 128
- Figura 5.28. Resistividade elétrica em campo 0 e 4 T em função de  $T^{1,5}$  [85]. 129



## Lista de tabelas

Tabela 2.1. Dependências das linhas $T_I$ , $T_{II}$ e $T_m$ para um sistema ferromagnético e antiferromagnético, tridimensional e bidimensional.	31
Tabela 2.2. Predições do comportamento crítico quântico com a temperatura para o caso 3D e 2D.	32
Tabela 4.1. Amostras preparadas da série $CeCoGe_{3-x}Si_x$ .	77
Tabela 4.2. Exemplo das quantidades (em gramas) dos elementos necessários para preparar 2 g de $CeCoGe_{2,1}Si_{0,9}$ .	78
Tabela 4.3. Temperaturas de fusão para os elementos utilizados.	79
Tabela 4.4. Lista de amostras do sistema $CeCoGe_{3-x}Si_x$ , indicando a perda de massa após a fusão.	80
Tabela 5.1. Parâmetros de rede $a$ e $c$ obtidos pelo refinamento de Rietveld dos difratogramas de raios-x das amostras $CeCoGe_{3-x}Si_x$ à temperatura ambiente.	98
Tabela 5.2. Valores de $T_N$ , e $\Delta$ para da medida com pressão de 5,5 kbar substituídos nas equações 5.6 e 5.7 para obter o valor de $\Gamma$ .	113