



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE IMPERATRIZ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS



MAURÍCIO SILVA LOPES

**PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E EFEITO MAGNETOCALÓRICO DOS
SISTEMAS $R\text{MAl}_3$ ($R = \text{La, Ce, Pr E Nd}$; $M = \text{Ag E Cu}$) E $\text{R}_2\text{AgCuAl}_6$ ($R = \text{Pr E Nd}$)**

MAURÍCIO SILVA LOPES

**PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E EFEITO MAGNETOCALÓRICO DOS
SISTEMAS $R\text{MAl}_3$ ($R = \text{La, Ce, Pr E Nd}$; $M = \text{Ag E Cu}$) E $\text{R}_2\text{AgCuAl}_6$ ($R = \text{Pr E Nd}$)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Luzeli Moreira da Silva

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silva Lopes, Maurício.

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E EFEITO MAGNETOCALÓRICO DOS
SISTEMAS $RMA13$ ($R = La, Ce, Pr$ E Nd ; $M = Ag$ E Cu) E
 $R2AgCuAl6$ ($R = Pr$ E Nd)/ Maurício Silva Lopes. - 2026.
93 f.

Orientador(a): Luzeli Moreira da Silva.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciência dos Materiais/ccim, Universidade Federal do
Maranhão, Imperatriz - Ma, 2026.

1. Compostos Intermetálicos. 2. Propriedades
Magnéticas. 3. Efeito Magnetocalórico. 4. Refrigeração
Magnética. I. Moreira da Silva, Luzeli. II. Título.

Membros da comissão julgadora da defesa da dissertação de mestrado do aluno **Maurício Silva Lopes**, apresentada e aprovada ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM), em 02/06/2026.

COMISSÃO JULGADORA:

- Prof^a. Dr^a. Luzeli Moreira da Silva (PPGCM/UFMA) - Presidente e Orientadora.
- Prof^a. Dr^a. Luciana Magalhães Rebelo Alencar (PPGCM/UFMA) - Avaliadora interna.
- Prof. Dr. Samuel Filgueiras Rodrigues (IFMA) - Avaliador externo.

OBS.: A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros, encontra-se na coordenação do programa da unidade.

À Sabina Fernandes
A professora que me alfabetizou

AGRADECIMENTOS

Fico muito agradecido em saber que você está lendo essa dissertação. Saiba que esse trabalho é o resultado de um sonho realizado. Quem conhece minha origem sabe que não era para eu chegar aonde cheguei, mas eu simplesmente não aceitei o que diziam que eu seria e me tornei o que era impossível para alguns. Nesse processo, eu me reinventei diversas vezes, sempre fui ciente das minhas limitações e sempre procurei ser resiliente.

Agradeço grandemente a Deus pela vida que tenho, pela saúde e pela oportunidade de cursar o mestrado em uma universidade pública federal e perto de casa.

Durante o mestrado, conheci pessoas incríveis que sempre estiveram e estão dispostas a me ajudar. Sem essas pessoas, esse trabalho não existiria. Então agradeço grandemente à Professora Doutora Luzeli Moreira da Silva pela orientação, ensinamentos, debates e por me aceitar como seu orientando. Para mim, é uma honra ser orientado por alguém tão competente quanto ela. A professora Luzeli simplesmente ama o que faz e sempre luta para garantir o melhor para o nosso laboratório. Ela é simplesmente uma profissional de excelência e tem minha admiração e respeito.

Agradeço a Jéssica por tudo. Ela tem uma humildade enorme e sempre tem paciência para ensinar os alunos novos que entram em nosso laboratório. Quando entrei no programa, a Jéssica estava concluindo o doutorado. Atualmente ela está fazendo o pós-doutorado. Apesar da alta titulação, ela nunca demonstrou sentimento de superioridade com ninguém. Ela tem minha admiração e meu respeito.

Agradeço grandemente ao meu grande amigo Hudson pelo apoio, pela amizade de longa data e pela ajuda nos cálculos de calor específico. Sua ajuda foi essencial para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a Hellen pelas ajudas lá no começo e até hoje. Sem sua ajuda, eu não teria conseguido aprender a usar o forno resistivo e nem teria feito no meu primeiro semestre oito medidas de calor específico no PPMS. Sua ajuda foi fundamental para esse trabalho, muito obrigado.

Agradeço a Amanda pelo apoio e por tornar nosso laboratório um ambiente mais divertido. Ela é uma boa pessoa e dedicada, pois sempre está na luta.

Agradeço grandemente ao Professor Doutor Mauro Bogéa Pereira, meu orientador na graduação. Saiba que sua ajuda e seu apoio foram fundamentais para a minha formação. Suas sugestões para fazer leitura de artigos em inglês para o TCC foram fundamentais para o mestrado. Sem sua ajuda eu não estaria aqui, pois foi você que me recomendou ao mestrado por meio da carta de recomendação. Admiro muito o profissional que você é. Muito obrigado.

Agradeço ao meu pai, Antônio, pelo apoio de sempre. Mesmo sendo analfabeto, é um homem sábio, honrado e trabalhador. Apesar de exigir que eu trabalhasse desde cedo, nunca me impediu de estudar e nunca deixou faltar o básico em casa. Se um dia eu me tornar pelo menos metade do homem que você é, já me considerarei alguém de grande valor. Seu exemplo me guia e me inspira a ser melhor todos os dias.

Agradeço à minha mãe, Simone, pelo apoio constante. Mesmo sem saber exatamente o que significa um mestrado, ela sempre encontrou palavras de incentivo que me mantiveram firme. Para ela, o importante nunca foi o nome do diploma, mas a minha capacidade de lutar. Suas mensagens de força, dizendo que eu sou capaz, que vou conseguir e que ora sempre por mim, me acompanharam em cada etapa.

Agradeço à minha namorada, Luziete, por caminhar ao meu lado com paciência, carinho e compreensão. Sua presença tornou mais leves os dias difíceis e mais especiais as conquistas. O apoio que ela me oferece, muitas vezes em silêncio, me fortalece e me lembra diariamente de que não estou sozinho nessa jornada. Ter alguém que acredita em mim desse jeito é um privilégio que valorizo profundamente.

Agradeço grandemente ao Município de São Francisco do Brejão por ter me concedido licença remunerada para cursar o mestrado. Essa cidade tem grande significado na minha vida pessoal e profissional. É desse município que tiro meu salário que garante minha sobrevivência. Além disso, essa cidade marca minha primeira aprovação em um concurso público.

Agradeço a todos os meus professores do ensino fundamental, do ensino médio e da graduação em Física, que contribuíram para minha formação acadêmica e humana. Cada um, à sua maneira, deixou marcas importantes no meu caminho.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho da Escola Comunitária Helena Miranda, que sempre acreditaram em mim, me apoiaram e me incentivaram a seguir em frente. Conviver com pessoas que confiam no meu potencial torna a jornada muito mais leve e significativa.

Agradeço ao Laboratório de Materiais Metálicos (LMM), ao Laboratório de Difração de Raios X (LDRX), à Central Multiusuária de Análise de Materiais (CeMAM), ao Laboratório de Biofísica e Nanosistemas (LBN) à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), à Unidade de Preparação e Caracterização de Materiais, à Universidade Federal do Maranhão (UFMA), à FAPEMA, ao CNPq e à CAPES pelo apoio essencial ao desenvolvimento deste trabalho. Cada uma dessas instituições contribuiu de maneira significativa para minha formação e para a realização desta pesquisa.

Posso não ter vitórias notáveis, mas posso te surpreender
com as derrotas que consegui sobreviver.
(Anton Chekhov)

RESUMO

Neste trabalho, investigaram-se as propriedades estruturais, magnéticas e magnetocalóricas dos compostos intermetálicos dos sistemas $R\text{MAl}_3$ ($R = \text{La, Ce, Pr e Nd}$; $M = \text{Ag e Cu}$) e $R_2\text{AgCuAl}_6$ ($R = \text{Pr e Nd}$). As amostras foram sintetizadas em forno a arco voltaico sob atmosfera de argônio e tratadas termicamente por 7 dias a 700 °C. A caracterização estrutural, por difração de raios X (DRX) e refinamento de Rietveld, e a caracterização microestrutural, por microscopia óptica, indicam que as ligas são monofásicas e revelam uma microestrutura homogênea em escala micrométrica. Medidas de calor específico (C_p) em função da variação de temperatura e campo magnético revelaram transições magnéticas em CeAgAl_3 , PrAgAl_3 e NdCuAl_3 em aproximadamente 4,8, 5,3 e 2,21 K, respectivamente, enquanto NdAgAl_3 , PrCuAl_3 e $\text{Nd}_2\text{AgCuAl}_6$ não exibiram ordenamento magnético detectável acima de 1,8 K. Os resultados de C_p normalizados pela temperatura evidenciaram a presença de anomalias de Schottky em todas as amostras analisadas, sendo mais intensas nos compostos NdAgAl_3 , PrCuAl_3 , NdCuAl_3 e $\text{Nd}_2\text{AgCuAl}_6$. A contribuição magnética para o C_p nos compostos CeAgAl_3 , PrAgAl_3 , PrCuAl_3 , NdAgAl_3 e NdCuAl_3 foi obtida pela subtração das contribuições dos análogos não magnéticos LaAgAl_3 e LaCuAl_3 , o que permitiu determinar a entropia magnética associada aos elétrons 4f (S_{4f}). A partir desses resultados, estimou-se, o número de microestados acessíveis na faixa de temperatura de 1,8 a 100 K. As grandezas que quantificam o Efeito Magnetocalórico (EMC), variação de entropia magnética ($-\Delta S$), variação adiabática da temperatura (ΔT_{ad}) e o Potencial de Resfriamento Relativo (RCP) foram determinadas a partir da entropia total (S). O composto CeAgAl_3 apresentou desempenho magnetocalórico expressivo, com valores máximos de $-\Delta S$ ($-\Delta S_{\text{máx}}$) e ΔT_{ad} ($\Delta T_{ad}^{\text{máx}}$) além de RCP da ordem de 10,32 J/kg·K, 3,15 K e 56,87 J/kg, respectivamente, para uma variação de campo magnético (ΔH) de 5 T. O PrAgAl_3 exibe valores reduzidos de $-\Delta S_{\text{máx}}$ ($\sim 4,68$ J/kg·K) e $\Delta T_{ad}^{\text{máx}}$ ($\sim 2,61$ K), mas mantém o RCP relativamente elevado ($\sim 62,49$ J/kg), indicando contribuição significativa do Campo Cristalino para o EMC, aspecto corroborado pelos resultados de PrCuAl_3 ($-\Delta S_{\text{máx}} = 2,71$ J/kg·K, $\Delta T_{ad}^{\text{máx}} = 1,14$ K e RCP = 41,69 J/kg). Entre os compostos investigados, NdCuAl_3 apresentou a melhor performance magnetocalórica com $-\Delta S_{\text{máx}} = 17,08$ J/kg·K, $\Delta T_{ad}^{\text{máx}} = 3,80$ K e RCP = 159,66 J/kg. Os resultados obtidos são comparáveis e, em alguns casos, superiores aos reportados na literatura para compostos intermetálicos similares, destacando especialmente o desempenho de CeAgAl_3 e NdCuAl_3 . Dessa forma, esses compostos mostram-se promissores para aplicação em sistemas de refrigeração magnética a temperaturas criogênicas, baseados no EMC.

Palavras-chave: Compostos intermetálicos. Propriedades magnéticas. Efeito magnetocalórico. Refrigeração magnética.

ABSTRACT

This study investigated the structural, magnetic, and magnetocaloric properties of the RMAI_3 ($\text{R} = \text{La, Ce, Pr, and Nd}$; $\text{M} = \text{Ag and Cu}$) and $\text{R}_2\text{AgCuAl}_6$ ($\text{R} = \text{Pr and Nd}$) intermetallic compounds. The samples were synthesized by arc melting under an argon atmosphere and subsequently annealed at 700°C for seven days. Structural characterization, by X-ray diffraction (XRD) and Rietveld refinement, and microstructural analyses, by optical microscopy, indicate the single-phase nature of the alloys and reveal a homogeneous microstructure at the micrometric scale. Specific heat (C_p) measurements as a function of temperature and magnetic field revealed magnetic ordering in CeAgAl_3 , PrAgAl_3 , and NdCuAl_3 at approximately 4.8, 5.3, and 2.21 K, respectively. In contrast, NdAgAl_3 , PrCuAl_3 , and $\text{Nd}_2\text{AgCuAl}_6$ did not exhibit detectable magnetic order above 1.8 K. The temperature-normalized C_p results indicate the Schottky anomaly in all analyzed samples, with higher intensities observed in the NdAgAl_3 , PrCuAl_3 , NdCuAl_3 , and $\text{Nd}_2\text{AgCuAl}_6$ compounds. The magnetic contribution to the specific heat of CeAgAl_3 , PrAgAl_3 , PrCuAl_3 , NdAgAl_3 , and NdCuAl_3 was obtained by subtracting the contributions of the non-magnetic analogs LaAgAl_3 or LaCuAl_3 . This procedure enables the determination of the 4f-electron contribution to the entropy (S_{4f}) and the estimation of the number of thermally accessible microstates that contribute to S_{4f} over the temperature range from 1.8 to 100 K. The quantities that quantify the Magnetocaloric Effect (MCE), magnetic entropy change ($-\Delta S$), adiabatic temperature change (ΔT_{ad}), and Relative Cooling Potential (RCP), were obtained from the total entropy (S) curves. The compound CeAgAl_3 exhibited remarkable magnetocaloric performance, with maximum values of $-\Delta S$ ($-\Delta S_{\text{max}}$) and ΔT_{ad} ($\Delta T_{ad}^{\text{max}}$) as well as RCP of approximately $10.32 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, 3.15 K , and 56.87 J/kg , respectively, for a magnetic field change (ΔH) of 5 T. PrAgAl_3 displayed lower values of $-\Delta S_{\text{max}}$ ($\sim 4.68 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) and $\Delta T_{ad}^{\text{max}}$ ($\sim 2.61 \text{ K}$), while maintaining a relatively high RCP ($\sim 62.49 \text{ J/kg}$), indicating a significant contribution of the crystal field effects to the MCE, an aspect corroborated by the results obtained for the compound PrCuAl_3 ($-\Delta S_{\text{max}} \sim 2.71 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $\Delta T_{ad}^{\text{max}} \sim 1.14 \text{ K}$, and $\text{RCP} = 41.69 \text{ J/kg}$). Among the investigated compounds, NdCuAl_3 exhibits the best magnetocaloric performance, with $-\Delta S_{\text{max}} = 17.08 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, $\Delta T_{ad}^{\text{max}} = 3.80 \text{ K}$, and $\text{RCP} = 159.66 \text{ J/kg}$. The obtained results are comparable to, and in some cases superior to, those reported in the literature for similar compounds, particularly highlighting the performance of CeAgAl_3 and NdCuAl_3 . Therefore, these compounds prove promising for application in magnetic refrigeration systems operating at cryogenic temperatures, based on the magnetocaloric effect.

Keywords: Intermetallic Compounds. Magnetic Properties. Magnetocaloric Effect. Magnetic Refrigeration.