

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”****ESTUDO DE VIABILIDADE DE FABRICAÇÃO DE CHAPA DE LIGA DE MAGNÉSIO PARA IMPLANTE MAXILOFACIAL BIOABSORVÍVEL**Clara Guazzelli<sup>1</sup> (IC), Bruno Xavier de Freitas (PQ)<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) - Instituto de Engenharia Mecânica (IEM).**Palavras-chave:** Ligas de magnésio. Implantes bioabsorvíveis. Biomateriais. Caracterização mecânica. Cálculo termodinâmico.**Introdução**

O desenvolvimento de novos implantes maxilofaciais bioabsorvíveis é de suma importância para o segmento de reconstrução facial, levando em consideração que implantes permanentes nem sempre são uma opção quando lesões pequenas tem capacidade de regeneração, visto que após a recuperação, o implante permanente permanece no corpo humano sem função. Logo, a não necessidade de uma segunda cirurgia para a remoção deste implante promove economia financeira, bem estar aos pacientes e ajuda a evitar complicações pós-operatórias (Akhmetshina, 2024). As ligas à base de magnésio são alternativas promissoras para uso em implantes bioabsorvíveis e combinadas com cálcio como elemento de liga, que é essencial para o funcionamento do corpo humano, não só traz benefícios microestruturais, em relação a propriedades mecânicas e resistência a corrosão, como redução do tamanho de grão e da taxa de degradação (Bakhsheshi-Rad, 2014), mas também promove benefícios na saúde como facilitação da cicatrização óssea. (Yang, 2023). O objetivo do trabalho é desenvolver chapas de liga à base de magnésio com pequena adição de cálcio, com composição química definida por meio de estudo da literatura e de cálculos termodinâmicos de diagrama de fases.

**Metodologia**

O estudo teve início com uma revisão bibliográfica sobre ligas de magnésio atuantes no setor de biomateriais que possuíssem propriedades mecânicas adequadas para aplicação maxilofacial. Foram, então, selecionadas as ligas à base de Mg-Ca como as mais promissoras e com os melhores resultados experimentais. Cálculos termodinâmicos foram feitos utilizando o programa de computador Thermo-Calc utilizando à base de dados TCMG6, visando determinar composições de ligas que possuíssem frações de fases

interessantes, que sugerem que a precipitação irá proporcionar um equilíbrio entre resistência mecânica próxima à do osso cortical e taxa de biodegradação coerente com o tempo de cicatrização. Logo, cálculos termodinâmicos de solidificação Scheil e fração de fase por temperatura foram realizados.

A liga selecionada foi produzida por fusão em forno de resistência elétrica em uma glove box com atmosfera controlada de argônio (99,999% min.) para minimizar a oxidação. Posteriormente, um lingote com dimensões de 60 x 80 x 20 mm foi obtido e passou por tratamento térmico para homogeneização à 320°C por 24 horas com atmosfera controlada de argônio (99,999% min.).

O lingote foi aplainado para uma espessura de 15 mm para a remoção de possíveis defeitos superficiais e laminado a quente, à 400°C, com reaquecimento de 5 minutos entre cada passe de laminação até a obtenção de uma chapa de aproximadamente 3,5 milímetros de espessura, que é adequada para aplicação maxilofacial. Para isso, foram necessários 37 passes, sendo dos passes de 1 a 5 com 1% de redução por passe, de 6 a 10 com 2% de redução, de 11 a 15 com 3%, de 16 a 20 com 4% e de 21 a 37 com 5%. Após a laminação foi cortado um pequeno pedaço da chapa, este foi lixado com as lixas P100, P220, P400, P600 e P1200 e então foi realizada a medida de dureza Vickers em triplicata em um microdurômetro utilizando carga de 100 gf por 15 segundos.

**Resultados e discussão**

Os cálculos termodinâmicos e estudos bibliográficos indicaram que a adição de cálcio causa formação de segunda fase, Mg<sub>2</sub>Ca, que precipita principalmente nos contornos de grão e tem efeito aumentador de resistência mecânica por funcionar como barreira para movimentação das discordâncias (Akhmetshina, 2024). Além disso, a adição de cálcio também promove a nucleação de grãos resultando no seu refinamento e sua deposição nos contornos de grão age como uma barreira

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

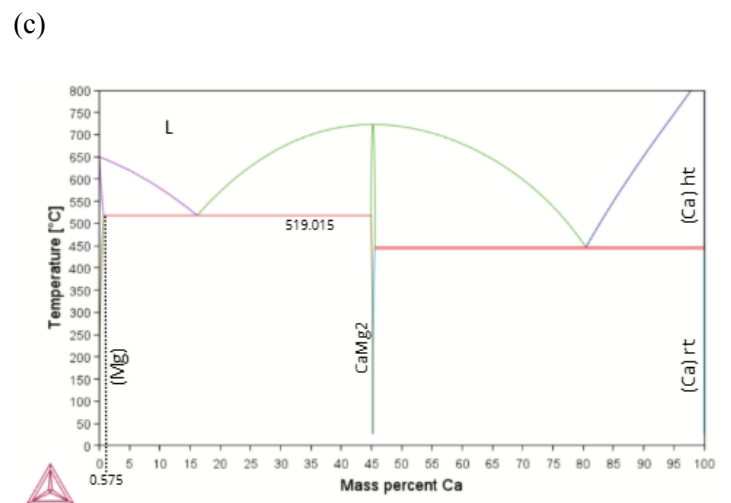
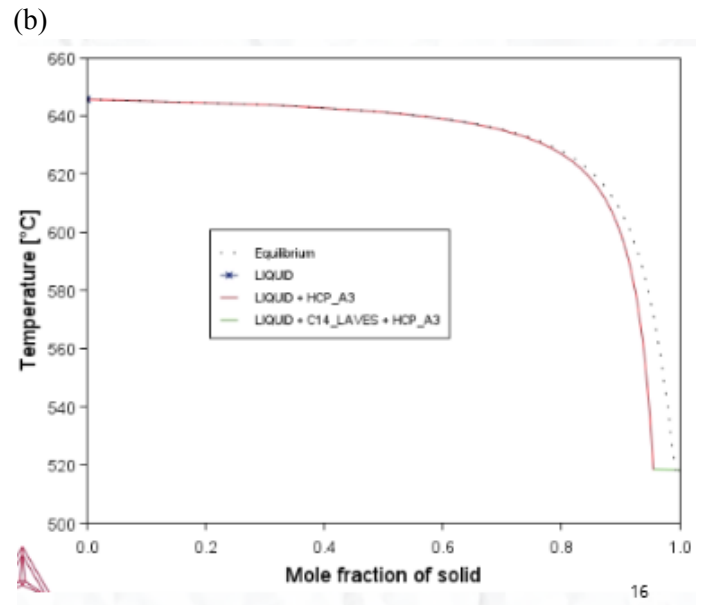
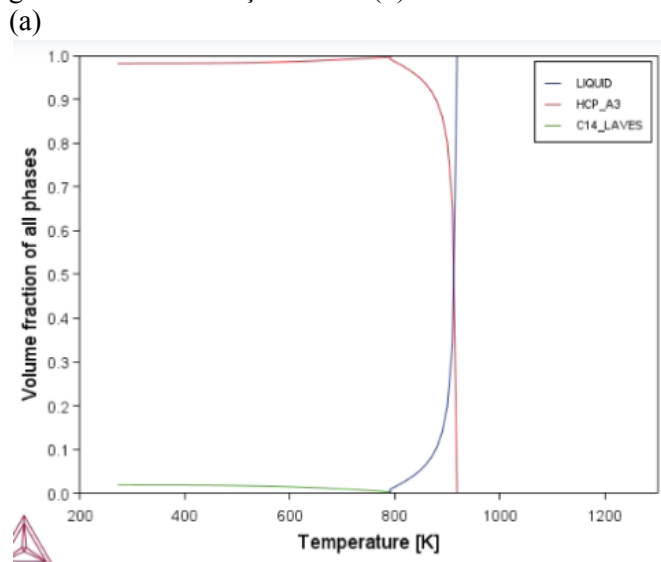
para a corrosão, além das ligas à base de Mg-Ca possuírem ótima compatibilidade óssea (Ci, 2023).

Nota-se a partir da Figura 1 (a), que apresenta a fração de fases por temperatura, que a fase  $Mg_2Ca$  (C14 Laves) é esperada que comece a se formar próxima à  $780^\circ C$  e em pequenas quantidades, no máximo 2% do volume total de fases, fato importante pois em grandes quantidades pode ter efeito contrário ao desejado quando se tratando de corrosão, acelerando o processo. Já a fase em maior quantidade é a de Mg em solução sólida (HCP A3).

A Figura 1 (b) mostra o processo teórico de solidificação da liga pelo método de Scheil. Observa-se que a fase HCP A3 precipita primeiro a cerca de  $645^\circ C$  e a fase  $Mg_2Ca$  precipita a cerca de  $520^\circ C$ . Além disso, percebe-se que no equilíbrio, Figura 1 (c), que apresenta o diagrama de fases binário Mg-Ca, à  $519^\circ C$ , o Ca tem uma solubilidade máxima de 0,575 % em massa no Mg, já em temperatura ambiente não há solubilidade.

Isso significa que a precipitação da fase  $Mg_2Ca$  é esperada e com isso um possível aumento de resistência mecânica por precipitação de segunda fase e por, também, por solução sólida.

Figura 1 – Fração molar de fase por temperatura (a) e gráfico de solidificação Scheil (b)



A Figura 2 se refere ao lingote obtido pelo processo de fusão, sendo visível a presença de defeitos de solidificação e pequenos óxidos que foram removidos após o aplainamento deste, e foi obtido um lingote de 15 mm de espessura.

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

Figura 2 - Lingote da liga de Mg após fusão.



A laminação proporcionou redução significativa da espessura de 15 mm para 3,43 mm, aproximadamente 77% de redução total, resultando em uma chapa com boa integridade superficial, sem ocorrência de trincas ou delaminações, como observado na Figura 3. Por ser feita à quente ocorre o processo de recristalização dinâmica durante a laminação, ocorrendo a formação de novos grãos, reduzidos pela adição de Ca.

Figura 3 - Chapa laminada da liga de Mg



A dureza média obtida foi de  $48 \pm 2$  HV, o valor acima do obtido por Harandi, 2013 que obteve 34 HV considerando mesma porcentagem de adição de Ca.

**Conclusões**

Portanto, diante do exposto, é possível concluir que apesar do grande número de passes de laminação foi possível obter uma chapa com dureza elevada e sem defeitos macroscópicos aparentes. E sugere-se que dureza elevada em relação ao que se espera de uma liga com pouca adição de Ca, é resultado da precipitação de segunda fase,  $Mg_2Ca$ , solução sólida de Ca no Mg e

refino de grão após a recristalização dinâmica durante a laminação. Provando que juntamente com o estudo bibliográfico e cálculos termodinâmicos, indicam caminhos para se produzir materiais com integridade estrutural, essencial para atender aos requisitos da aplicação.

**Agradecimentos**

Este trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo nº APQ-00682-24.

Aos laboratórios de Análises Superficiais (LAS), de Tratamentos Superficiais (LTS) e de Processos de Fabricação (LPF), localizados no Centro Multiusuário de Processamento e Caracterização de Materiais (CEMPROCAM) da Universidade Federal de Itajubá pela infraestrutura disponibilizada.

**Referências**

AKHMETSHINA, Tatiana; BERGER, Leopold; BASU, Indranil et al. *High-performance ultra-lean biodegradable Mg–Ca alloys and guidelines for their processing*. Acta Materialia, v. 278, 2024.

BAKSHESHI-RAD, H.R; IDRIS, M.H; ABDUL-KADIR, M.R et al. *Mechanical and bio-corrosion properties of quaternary Mg–Ca–Mn–Zn alloys compared with binary Mg–Ca alloys*. Materials & Design, v. 53, p. 283-292, 2014.

CI, Wenjun; DENG, Lili; CHEN, Xianhua et al. *Effect of minor Ca addition on microstructure and corrosion behavior of Mg–Y–Ca alloys*. Journal of Materials Research and Technology, v. 26, p. 7502-7515, 2023.

YANG, Yan; XIONG, Xiaoming; CHEN, Jing et al. *Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022*. Journal of Magnesium and Alloys, v. 11, p. 2611–2654, 2023.

HARANDI, Shervin Eslami et al. *Effect of calcium content on the microstructure, hardness and in-vitro corrosion behavior of biodegradable Mg–Ca binary alloy*. Materials Research, v. 16, p. 11-18, 2013.

*“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”*