

PLANO DE ESTUDO DE DOUTORADO

**Desenvolvimento de ligas à base de Mg-Al-Mn com adição
de Ca**

Candidato: Diego Magalhães Baía

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho

LORENA

2023

RESUMO

Nas indústrias automobilística, aeronáutica e aeroespacial, as ligas de magnésio têm se tornado cada vez mais atrativas, principalmente devido à sua baixa massa específica. Porém, sua alta susceptibilidade à oxidação e, conseqüentemente, a alta inflamabilidade, faz com que a aplicação do magnésio e suas ligas nesses setores sejam limitadas. Em vista disso, o trabalho proposto tem o objetivo de desenvolver ligas à base de magnésio-alumínio-manganês que possuem boa resistência à oxidação e propriedades mecânicas adequadas para aplicações aeroespaciais. O ponto de partida do trabalho será a realização de cálculos termodinâmicos usando o software ThermoCalc e a base dados específica para ligas de magnésio (TCMG6), adicionando pequenas frações de cálcio para a obtenção de informações microestruturais tais como tipos de fases e suas quantidades assim como o intervalo de temperatura nos quais essas fases são estáveis. Além disso, as ligas serão laminadas nas formas de chapas e executados ensaios mecânicos em temperatura ambiente e ensaios de oxidação em altas temperaturas tanto no estado bruto de fusão como após tratamentos térmicos e laminação, para acompanhar a variação das propriedades e avaliação das microestruturas apropriada para a aplicação pretendida. As amostras em todas as condições de processamento serão caracterizadas microestruturalmente e os resultados serão comparados àqueles calculados termodinamicamente (Thermo-Calc/TCMG6).

Palavras-Chave: Ligas de Magnésio, Oxidação, Caracterização microestrutural

SUMÁRIO

1 Introdução	4
1.1 Justificativa	4
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo geral	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
2 Revisão Bibliográfica	6
2.1 Magnésio e suas ligas	6
2.1.1 Nomenclatura	6
2.1.2 Efeito dos Elementos de Liga	7
2.1.2.1 Efeito do Cálcio como Elemento de Liga	9
2.2 Oxidação e Resistência a Ignição do Magnésio e suas Ligas	9
3 Materiais e Metodologia	12
3.1 Cálculos Termodinâmicos	13
3.2 Confeção da Liga	13
3.3 Ensaios Mecânicos e de Oxidação	14
3.4 Caracterização microestrutural	15
4 Infraestrutura e Recursos Necessários	16
5 Referências Bibliográficas	17
6 Cronograma de Atividades	20

1 INTRODUÇÃO

As características do magnésio como baixo ponto de fusão (alta fluidez em processos de fundição) e baixa massa específica torna-o promissor para diversas aplicações na indústria automotiva, aeronáutica e aeroespacial. As ligas de magnésio mais comuns são compostas principalmente por alumínio-zinco (Al-Zn) e alumínio-manganês (Al-Mn) que possuem boa resistência mecânica à temperatura ambiente. No entanto, para a maioria das ligas, aplicações em alta temperatura são limitadas devido ao detrimento de certas propriedades, como acelerada oxidação e susceptibilidade à ignição (BAMBERGER; DOBRZAŃSKI; TOTTEN, 2020; CHOI; KURODA; OKIDO, 2016; CZERWINSKI, 2002).

Inúmeros estudos são realizados para o aprimoramento dessas ligas para suas aplicações em altas temperaturas. Com isso, um dos procedimentos estudados é a adição de elementos de liga, como ítrio e elementos terras raras, que favorecem a formação de uma camada de passivação na superfície da liga, e também na formação de precipitados de alta estabilidade térmica que estabilizam sua microestrutura. Outro elemento que vem sendo investigado é o cálcio, visto que também auxilia nessas propriedades em algumas ligas dessas famílias (CZERWINSKI, 2014; KOLTYGIN; BAZLOVA, 2012; ZHU et al., 2022).

1.1 Justificativa

No setor industrial, principalmente os setores automotivo e aeronáutico, a procura de materiais mais leves, ecologicamente sustentáveis e com melhor relação custo-benefício tem sido intensificada, sendo imprescindível o desenvolvimento de materiais que combinam baixa massa específica com propriedades mecânicas e de corrosão para as suas aplicações correspondentes.

As ligas à base de magnésio são algumas das principais candidatas às aplicações do setor aeronáutico por possuir massa específica 64% menor que as de alumínio. Para esse setor específico, a pesquisa e desenvolvimento de ligas que têm baixa inflamabilidade, estabilidade microestrutural e propriedades mecânicas adequadas é essencial. Somado a isso, ainda há grande demanda de pesquisas relacionadas a ligas de magnésio quanto a informações que suportem o processamento mecânico, montagem e serviços de manutenção de peças para que sejam aplicadas de forma mais acentuada no mercado (JOOST; KRAJEWSKI, 2017).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é o desenvolvimento de ligas à base de magnésio-alumínio-manganês com adições de cálcio visando a obtenção materiais com resistência à oxidação e propriedades mecânicas satisfatórias para aplicações aeroespaciais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliação de composições químicas de ligas à base magnésio-alumínio-manganês (AM50 e AM60) com adições de cálcio por meio de cálculos termodinâmicos com o uso do *software* Thermo-Calc e base de dados específica para ligas de Mg (TCMG6) para obtenção de ligas com elevada temperatura *solidus* e fração de adequada de precipitados responsáveis pelas propriedades mecânicas e pela proteção contra oxidação.
- Avaliação da temperatura de tratamento térmico de homogeneização de ligas à base magnésio-alumínio-manganês (AM50 e AM60) com adições de cálcio selecionadas por meio de cálculos termodinâmicos com o uso do *software* Thermo-Calc e da base de dados específica TCMG6.
- Avaliação microestrutural de amostras das chapas obtidas.
- Avaliação, em temperatura ambiente, de propriedades mecânicas básicas de ligas selecionadas a serem obtidas em ensaios de tração e dureza, tanto nas ligas no estado bruto de fusão como após tratamentos térmicos de homogeneização e processamento mecânico.
- Avaliação da resistência à oxidação em temperaturas elevadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Magnésio e suas ligas

O magnésio é um dos elementos mais abundantes no planeta. Suas características principais incluem: baixa massa específica (1738 kg.m^{-3}), baixo ponto de fusão ($\sim 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e estrutura cristalina hexagonal compacta. Essas propriedades tornam o magnésio atraente para aplicações em diversas áreas industriais, particularmente a automotiva, aeronáutica e aeroespacial, assim como em aplicações na medicina como biomateriais devido a sua absorção natural no organismo (BAMBERGER; DOBRZAŃSKI; TOTTEN, 2020).

Porém, o magnésio possui altíssima susceptibilidade à oxidação. Além disso, o magnésio possui a razão de Pilling-Bedworth abaixo de 1 ($PBR_{Mg} = 0,8$), ou seja, o filme de óxido formado na superfície do metal é quebradiço e não possui efeito protetor no material. Por essa razão, o magnésio possui uma alta facilidade de ignição em altas temperaturas, entrando em combustão a aproximadamente $470 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (BEDWORTH; PILLING, 1923; TAN et al., 2016).

A fenômeno de ignição e inflamabilidade do magnésio está amplamente atrelado à sua oxidação em altas temperaturas, o que torna a aplicação desse metal e de suas ligas desafiador nas áreas aeronáutica e aeroespacial (HAN et al., 2020; TEKUMALLA; GUPTA, 2017).

2.1.1 Nomenclatura

As ligas de magnésio são nomeadas de acordo com os dois principais elementos de liga presentes, da seguinte forma:

1. Duas letras iniciais indicando os dois principais elementos de ligas presentes, em ordem crescente, e;
2. Dois números finais, indicando a composição química em porcentagem do primeiro e segundo elementos de liga mais presentes, respectivamente. Caso a composição dos elementos de liga sejam aproximadamente iguais, a nomenclatura é finalizada com somente um número.

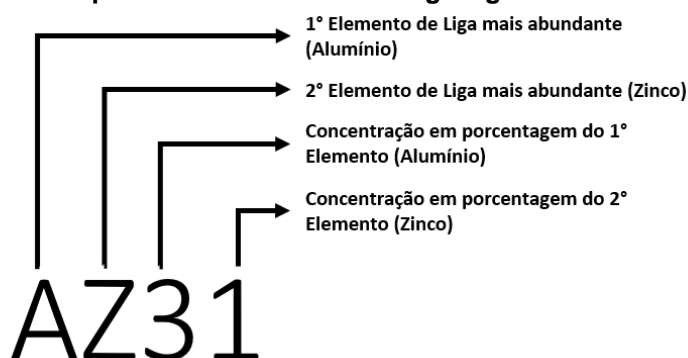
As letras que representam os principais elementos de liga no magnésio são apresentadas na Tabela 1 e na Figura 1 é exibida uma exemplificação da nomenclatura dessas ligas (ASTM INTERNATIONAL, 2011).

Tabela 1: Algumas das representações dos elementos de liga na nomenclatura para as ligas de magnésio

<i>A</i>	Alumínio	<i>M</i>	Manganês
<i>C</i>	Cobre	<i>Q</i>	Prata
<i>E</i>	Terras Raras	<i>S</i>	Silício
<i>H</i>	Tório	<i>T</i>	Estanho
<i>J</i>	Estrôncio	<i>V</i>	Gadolínio
<i>K</i>	Zircônio	<i>W</i>	Ítrio
<i>L</i>	Lítio	<i>Z</i>	Zinco

Fonte: (ASTM INTERNATIONAL, 2011)

Figura 1: Exemplo de Nomenclatura da Liga Mg-3.3Al-1.2Zn-0.4Mn.



Fonte: Elaborado de (LIU et al., 2015)

2.1.2 Efeito dos Elementos de Liga

Como todo metal puro, elementos de ligas podem ser adicionados para aprimorar certas propriedades chave do metal. No caso do magnésio, os elementos de liga são usados para melhorar as propriedades mecânicas, resistência a corrosão e melhoria do filme de óxido na superfície da liga. Os elementos de liga mais comumente utilizados nas ligas de Mg é o alumínio (Al) e o zinco (Zn). Recentemente, tem-se estudado os efeitos positivos da adição de outros elementos de liga no magnésio, como o cálcio (Ca), ítrio (Y) e elementos terras raras para melhor resistência a oxidação pela melhoria do filme passivador na superfície da liga. (BAMBERGER; DOBRZAŃSKI; TOTTEN, 2020; TEKUMALLA; GUPTA, 2017)

Na Tabela 2 estão descritos os principais elementos de liga do magnésio e suas principais funções.

Tabela 2: Efeitos dos elementos de liga mais comumente usados nas ligas de Mg.

Alumínio (<i>Al</i>)	—	Aumenta a dureza e a resistência mecânica sem alterar significativamente o baixo peso atômico;
	—	Diminui a ductilidade.
Berílio (<i>Be</i>)	—	Reduz significativamente a oxidação superficial na fusão do metal;
	—	Auxilia na resistência à ignição.
Cálcio (<i>Ca</i>)	—	Melhora as propriedades mecânicas devido ao refinamento do grão;
	—	Aprimora as propriedades térmicas, elevando a temperatura de ignição da liga;
	—	Reduz a oxidação durante o processamento termomecânico.
Cério (<i>Ce</i>)	—	Aumenta a resistência à corrosão;
	—	Eleva a capacidade de deformação plástica;
	—	Auxilia na resistência à ignição.
Cobre (<i>Cu</i>)	—	Aumenta a resistência mecânica.
Manganês (<i>Mn</i>)	—	Aumenta a resistência mecânica;
	—	Promove a resistência a corrosão.
Níquel (<i>Ni</i>)	—	Aumenta a resistência mecânica.
Terras Raras (<i>Nd, Gd, Er, etc.</i>)	—	Aumenta a resistência à corrosão;
	—	Aumento a resistência mecânica;
	—	Melhora a resistência à ignição.
Silício (<i>Si</i>)	—	Melhora a resistência mecânica em altas temperaturas
Estrôncio (<i>Sr</i>)	—	Eleva a resistência à abrasão;
	—	Usado em conjunção com outros elementos de liga.
Ítrio (<i>Y</i>)	—	Aumenta a resistência mecânica em altas temperaturas;
	—	Comumente combinado com outras terras raras.
Zinco (<i>Zn</i>)	—	Melhora a fluidez da liga fundida;
	—	Aumenta a resistência mecânica.

Fonte: (AYDIN, 2022; BAMBERGER; DOBRZAŃSKI; TOTTEN, 2020; CZERWINSKI, 2004, 2014; DING et al., 2014; KWAK; LIM; KIM, 2016; MEZBAHUL-ISLAM; MOSTAFA; MEDRAJ, 2014; PRASAD; SHI; ATRENS, 2012)

2.1.2.1 Efeito do Cálcio como Elemento de Liga

Novos trabalhos têm sido realizados para compreender o efeito do *Ca* nas propriedades mecânicas e térmicas das ligas de *Mg*. KONDORI et MAHMUDI (2010) estudou o efeito do *Ca* nas propriedades mecânicas em altas temperaturas e a estabilidade térmica da liga AM60 e revelou que pequenos teores de *Ca* (0,5 %*p.Ca*) diminuem a presença do precipitado $Mg_{17}Al_{12}$. De outro modo, maiores teores de *Ca* (1,2 %*p.Ca*) já apresenta o precipitado Al_2Ca , com elevado ponto de fusão e termicamente mais estável que o precipitado anterior. A presença desse precipitado permitiu uma maior estabilidade microestrutural da liga em altas temperaturas, mantendo o refinamento do grão mesmo após 24 horas de exposição a temperatura de 400 °C. Porém, as propriedades de resistência mecânica da liga decaíram com teores de 2 %*p.Ca*.

Em continuidade, KONDORI et MAHMUDI (2017) também estudaram a propriedades de fluência de uma liga de *Mg – Al – Mn* com adições de cálcio e concluíram que seu acréscimo favoreceu substancialmente a resistência a fluência da liga, principalmente devido ao precipitado Al_2Ca . Outro fator contribuidor desse precipitado é sua morfologia lamelar que absorve o precipitado de $Mg_{17}Al_{12}$ quando exposto em altas temperaturas.

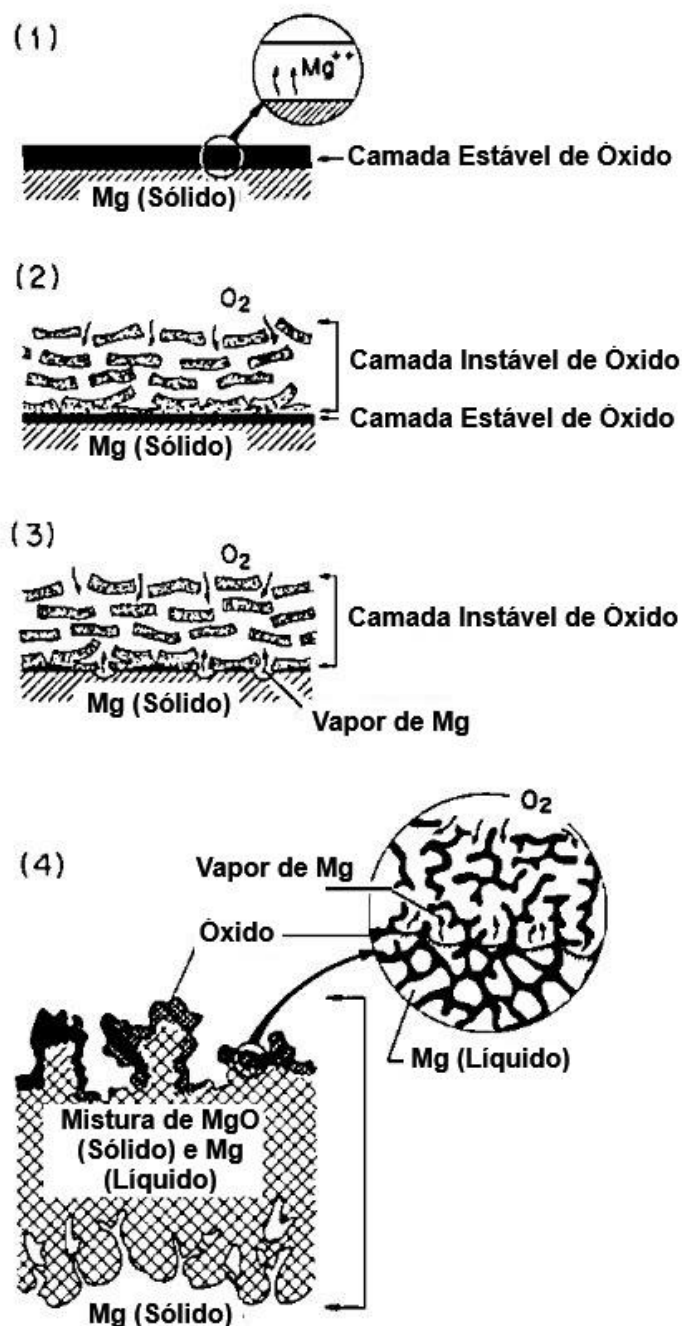
Pode-se entender que a adição de *Ca* como elemento de liga propicia a liga de *Mg* os seguintes efeitos: resistência por meio de solução sólida do cálcio com a microestrutura, principalmente nos precipitados $Mg_{17}Al_{12}$; refinamento da microestrutura devido a presença de precipitados de $(Mg,Al)_2Ca$, provocando ancoramento dos grãos de $\alpha - Mg$; e estabilidade térmica da microestrutura devido ao alto ponto de fusão dos precipitados a base de cálcio, favorecendo a resistência mecânica em altas temperaturas e a resistência à ignição. (HAN et al., 2020, 2008; NAGHDI et al., 2016; TEKUMALLA; GUPTA, 2017; TERADA et al., 2004)

2.2 Oxidação e Resistência a Ignição do Magnésio e suas Ligas

A inflamabilidade pode ser definida como a susceptibilidade de um material sofrer combustão em contato com uma fonte de calor. No caso do magnésio, a ignição do material está intimamente ligada à sua oxidação. Seu filme passivador de óxido de magnésio é capaz de prevenir a formação de vapores de magnésio, porém sua formação favorece ainda mais a fusão do metal devido a reação exotérmica do

magnésio com o oxigênio. Assim, o filme de óxido formado na superfície não suporta a pressão da camada líquida abaixo da superfície e são abertas fissuras que liberam Mg na forma líquida e gasosa, causando a ignição do metal. A Figura 2 esquematiza esse processo. (AYDIN et al., 2013; CZERWINSKI, 2004; TEKUMALLA; GUPTA, 2017)

Figura 2: Descrição esquemática da reação de ignição do magnésio. (1) Processo de oxidação do magnésio acelerando em função da temperatura. (2) Deterioração da camada de óxido expondo o Mg metálico. (3) Formação de fissuras no filme de óxido e a liberação de magnésio na forma líquida e gasosa. (d) Vapores de magnésio entram em contato com a atmosfera, causando a ignição.

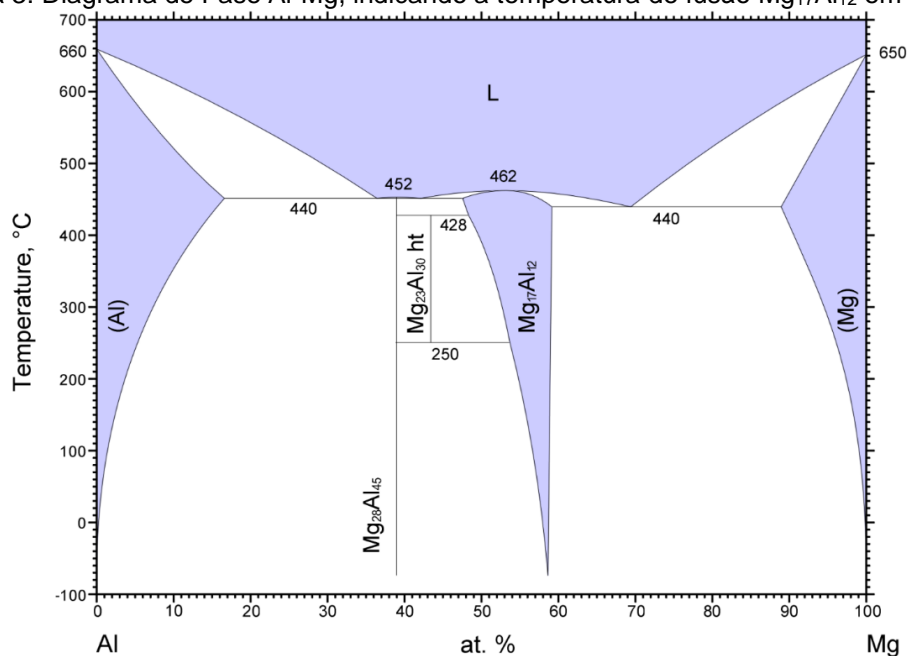


Fonte: Adaptado de (TAKENO; YUASA, 1980)

No caso das ligas à base de Mg, além da camada de passivação, os precipitados intermetálicos presentes na liga também interferem significativamente no fenômeno de ignição do material. Os precipitados de baixo ponto de fusão facilitam a ignição, tornando a liga inflamável ainda no estado sólido, como é o caso do precipitado $Mg_{17}Al_{12}$ comumente presente nas ligas de Mg-Al, que se fundem a partir de 437 °C. (KONDORI; MAHMUDI, 2010; TEKUMALLA; GUPTA, 2017)

PRASAD; SHI e ATRENS, (2012), por exemplo, determinaram que um dos motivos para a baixa resistência à ignição das ligas Mg-Al é a presença desses precipitados de $Mg_{17}Al_{12}$. O diagrama de fases Al-Mg, apresentado na Figura 3, mostra a diminuição do ponto de fusão dessas ligas devido às transformações eutéticas, sendo o $Mg_{17}Al_{12}$ a fase majoritária nos microconstituintes eutéticos em ligas Mg-Al.

Figura 3: Diagrama de Fase Al-Mg, indicando a temperatura de fusão $Mg_{17}Al_{12}$ em 462 °C.



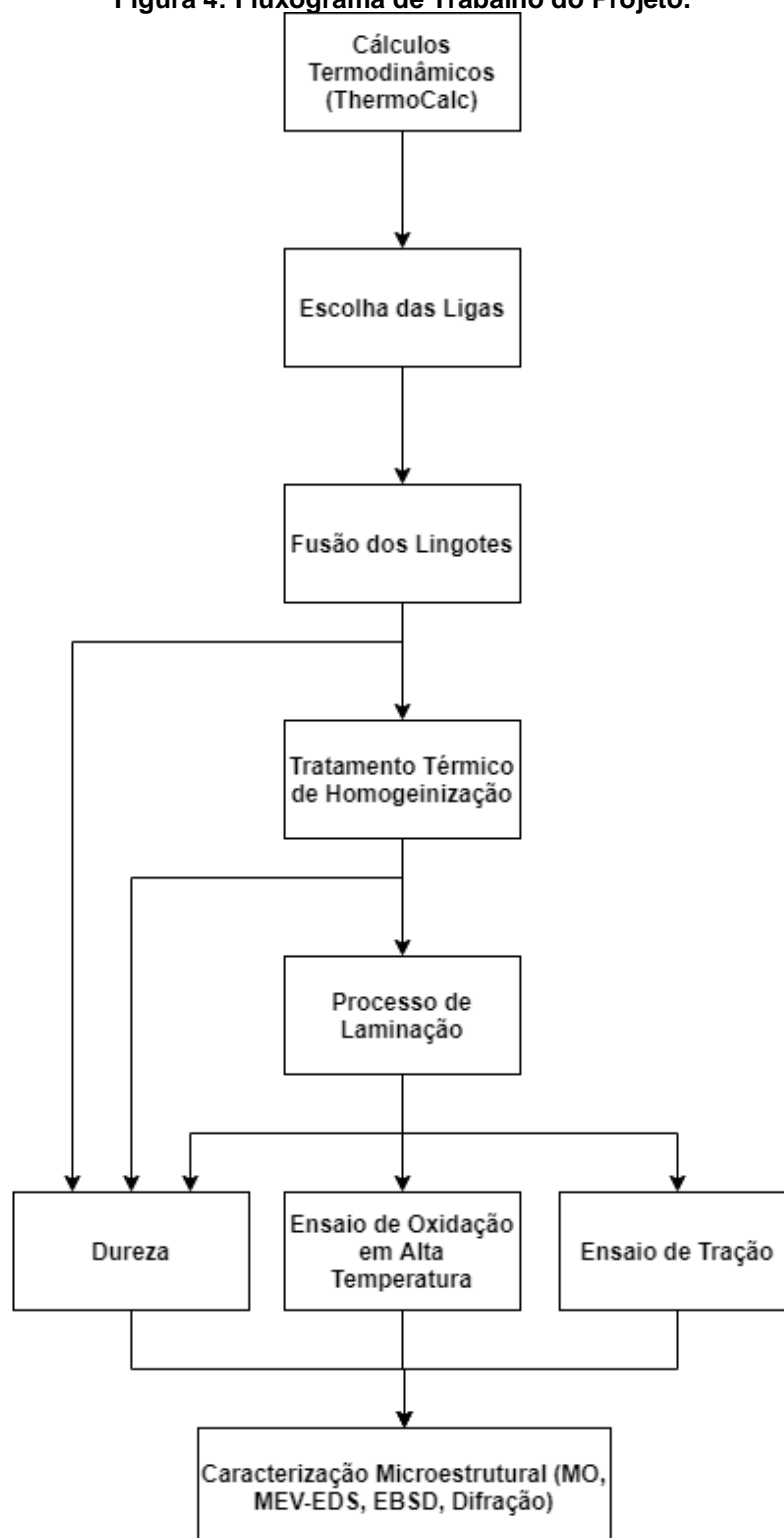
Fonte: (ASM INTERNATIONAL, [s.d.]; ZHONG; YANG; LIU, 2005)

A adição de Ca às ligas Mg-Al torna-se promissora para a diminuição da fração desses precipitados de baixo ponto de fusão e a formação de precipitados mais estáveis. A presença desses precipitados mais estáveis favorece a integridade do filme passivador na superfície da liga, promovendo também um aumento na temperatura *solidus* da liga e, conseqüentemente, melhor resistência à ignição do material. (CHOI; KURODA; OKIDO, 2016; KIM; KIM, 2015; KWAK; LIM; KIM, 2016; LEE, 2013; SHIH; WANG; CHONG, 2004)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentadas as principais etapas do trabalho na sequência prevista para sua execução. Na Figura 4, encontra-se o fluxograma de trabalho que apresenta as fases do projeto.

Figura 4: Fluxograma de Trabalho do Projeto.



Fonte: Autor.

3.1 Cálculos Termodinâmicos

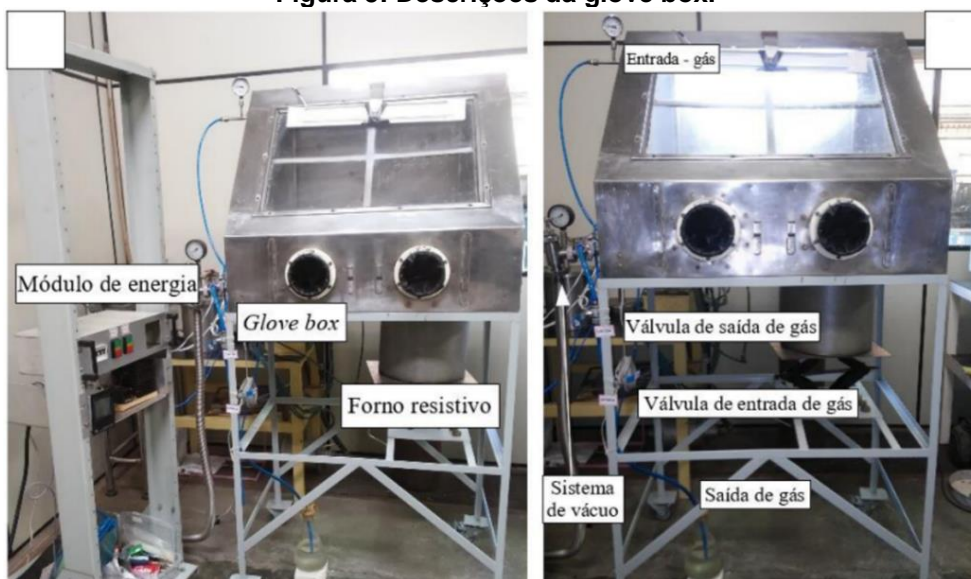
A primeira etapa do trabalho consistirá na realização de cálculos termodinâmicos com auxílio do *software* Thermo-Calc com a base de dados específica para ligas à base de magnésio (TCMG6). O objetivo dessa etapa será determinar as composições das ligas mais promissoras para o propósito principal do trabalho. Como ponto de partida, serão calculadas as ligas do sistema Mg-Al-Mn (AM50 e AM60) com diferentes teores de Ca, limitando essas adições a 2 %p.Ca, pois valores superiores a isso afetam negativamente algumas propriedades mecânicas (DING et al., 2014). Além da composição, também será definida a melhor temperatura de homogeneização da liga para a obtenção de uma microestrutura com menor fração volumétrica de precipitados de baixo ponto de fusão. Com o resultado dos cálculos termodinâmicos, duas ligas serão escolhidas para a confecção e estudo experimental.

3.2 Confecção das Ligas

Após os cálculos termodinâmicos, a próxima etapa do trabalho corresponde à confecção das ligas e será subdividida em fusão, tratamento térmico e laminação.

No processo de fusão serão produzidos lingotes em uma *glove box* construída por FREITAS (2020). A *glove box*, apresentada na Figura 5, contém um forno resistivo acoplado e possui sistema de injeção de gás e de estabelecimento de vácuo, apropriado para a fusão de ligas à base de Mg.

Figura 5: Descrições da glove box.



Fonte: (FREITAS, 2020)

Os metais puros serão pesados apropriadamente e fundidos sobre atmosfera controlada de argônio para diminuição da oxidação do magnésio durante a fusão. A liga será fundida em cadinho de aço inoxidável e será utilizado um molde de grafite para fabricação de lingotes com massa aproximada de 300 g.

Após a fusão da liga, o lingote será submetido a tratamento térmico de homogeneização para minimizar a microsegregação típica da estrutura bruta de fusão e, após o tratamento térmico, o lingote sofrerá o processo de laminação a quente em múltiplos passes para obtenção de chapas de três milímetros de espessura.

Após cada processo (fusão, tratamento térmico e laminação), será separada uma parte do material para a realização de ensaios dureza e para caracterização microestrutural das ligas nessas etapas.

3.3 Ensaios Mecânicos e de Oxidação

Após a laminação, amostras serão retiradas das chapas e corpos de provas serão confeccionados para os ensaios de tração e oxidação.

As propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração e dureza serão avaliadas e comparadas com as ligas de Mg mais comumente usadas nas indústrias aeroespacial e automotiva. A dureza das ligas será comparada com cada etapa do seu processo de fabricação e com o produto final, avaliando a evolução da resistência das ligas em cada processo. No ensaio de tração, os corpos-de-prova serão confeccionados de acordo com a norma ASTM E8-E8M. Para obtenção de base estatística, serão preparados pelo menos três corpos-de-prova para cada liga. A execução do ensaio de tração será feita à taxa de deformação constante, a ser determinada por meio de estudos anteriores na literatura.

Para a realização dos testes de oxidação, amostras na forma de discos com diâmetro e espessura de 6,0 x 2,0 mm serão obtidas a partir das chapas, suas superfícies serão lixadas com lixa de carbetto de silício até a grana 2400, seguido de limpeza ultrassônica em acetona, posteriormente em etanol e depois secas em ar quente. Para obter a média dos resultados, um lote composto por três de amostras de cada composição para cada temperatura de exposição será utilizado. Os corpos de prova serão colocados verticalmente em cadinhos de alumina, com mínimo contato entre a superfície das amostras e o cadinho, e então inseridos em fornos pré-aquecidos sob ar estático. As temperaturas de exposição que irão ser avaliadas serão

determinadas por meio de cálculos termodinâmicos utilizando o *software* Thermo-Calc e a base de dados TCMG6.

3.4 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural das ligas será realizada após cada etapa do processo de fabricação das mesmas, como também após os ensaios mecânicos de tração e oxidação. A microscopia óptica, difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura serão as técnicas de caracterização utilizadas em todas as amostras. A técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD) será também utilizada, porém somente em amostras específicas. Na caracterização microestrutural, o objetivo é determinar a microestrutura de cada amostra, compará-la com os cálculos realizados no Thermo-Calc, assim como a observar a influência da morfologia, tamanho e distribuição das fases e a textura cristalográfica nas propriedades medidas.

4 INFRAESTRUTURA E RECURSOS NECESSÁRIOS

Os principais equipamentos para a realização da pesquisa proposta são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Principais equipamentos a serem utilizados durante a pesquisa.

Principais Equipamentos	Instituição
<i>Glove Box</i> e Forno Resistivo com sistema de gás e vácuo	<i>EEL – USP</i>
Fornos de Tratamentos Térmicos	<i>EEL – USP</i>
Laminador FENN Manufacture	<i>EEL – USP</i>
Durômetro	<i>EEL – USP</i>
Máquina Universal de Ensaio Mecânicos	<i>EEL – USP</i>
Equipamentos para Preparação Metalográfica	<i>EEL – USP</i>
Microscópio Óptico	<i>EEL – USP</i>
Microscópio Eletrônico de Varredura (TESCAN Mira ^{4th})	<i>EEL – USP</i>

Fonte: Autor

Os recursos necessários para o desenvolvimento do projeto serão aqueles disponíveis no grupo de pesquisa responsável por sua execução.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM INTERNATIONAL. **ASM Alloy Phase Diagram Database**. , [s.d.]. Disponível em: <<http://d59015b0b029d83-www-asminternational-org.proxy.dotlib.com.br>>

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM B951-11(2018) - Practice for Codification of Unalloyed Magnesium and Magnesium-Alloys, Cast and Wrought**. [s.l.] ASTM International, 2011. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?B951-11R18>>. Acesso em: 13 out. 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **E8/E8M - 16a Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2016. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E8E8M-16A>>.

AYDIN, D. S. et al. The high temperature oxidation and ignition behavior of Mg–Nd alloys part I: The oxidation of dilute alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 569, p. 35–44, ago. 2013.

AYDIN, D. S. **High temperature oxidation and ignition behaviour of magnesium alloys containing strontium (Sr) and neodymium (Nd)**. Tese de Doutorado—Montréal, Canada: McGill University, 2022.

BAMBERGER, M.; DOBRZAŃSKI, L. A.; TOTTEN, G. E. (EDS.). The Importance of Magnesium and Its Alloys in Modern Technology and Methods of Shaping Their Structure and Properties. Em: **Magnesium and its alloys: technology and applications**. Metals and alloys. First edition ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2020. p. 1–28.

BEDWORTH, R. E.; PILLING, N. B. The oxidation of metals at high temperatures. **J Inst Met**, v. 29, n. 3, p. 529–582, 1923.

CHOI, Y.-I.; KURODA, K.; OKIDO, M. Temperature-dependent corrosion behaviour of flame-resistant, Ca-containing AZX911 and AMX602 Mg alloys. **Corrosion Science**, v. 103, p. 181–188, fev. 2016.

CZERWINSKI, F. The oxidation behaviour of an AZ91D magnesium alloy at high temperatures. **Acta Materialia**, v. 50, n. 10, p. 2639–2654, jun. 2002.

CZERWINSKI, F. The early stage oxidation and evaporation of Mg–9%Al–1%Zn alloy. **Corrosion Science**, v. 46, n. 2, p. 377–386, fev. 2004.

CZERWINSKI, F. Controlling the ignition and flammability of magnesium for aerospace applications. **Corrosion Science**, v. 86, p. 1–16, set. 2014.

DING, J. et al. Study of Ca and Ce Additions on Different Ignition Resistance Behavior of Magnesium Alloy. **Materials Science Forum**, v. 788, p. 7–11, abr. 2014.

FREITAS, B. X. DE. **Processamento e Caracterização de Ligas à Base de Magnésio Bioabsorvíveis**. Tese de Doutorado—Lorena, SP: Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, 2020.

HAN, D. et al. A review on ignition mechanisms and characteristics of magnesium alloys. **Journal of Magnesium and Alloys**, v. 8, n. 2, p. 329–344, jun. 2020.

HAN, L. et al. Microstructure and nano-scale mechanical behavior of Mg–Al and Mg–Al–Ca alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 473, n. 1–2, p. 16–27, jan. 2008.

JOOST, W. J.; KRAJEWSKI, P. E. Towards magnesium alloys for high-volume automotive applications. **Scripta Materialia**, v. 128, p. 107–112, fev. 2017.

KIM, Y. H.; KIM, W. J. Flame-resistant Ca-containing AZ31 magnesium alloy sheets with good mechanical properties fabricated by a combination of strip casting and high-ratio differential speed rolling methods. **Metals and Materials International**, v. 21, n. 2, p. 374–381, mar. 2015.

KOLTYGIN, A. V.; BAZLOVA, T. A. Effect of low additives of calcium on corrosion resistance of alloys of the Mg – Al – Zn – Mn system. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 53, n. 11–12, p. 584–588, mar. 2012.

KONDORI, B.; MAHMUDI, R. Effect of Ca additions on the microstructure, thermal stability and mechanical properties of a cast AM60 magnesium alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 7–8, p. 2014–2021, mar. 2010.

KONDORI, B.; MAHMUDI, R. Effect of Ca additions on the microstructure and creep properties of a cast Mg–Al–Mn magnesium alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 700, p. 438–447, jul. 2017.

KWAK, T. Y.; LIM, H. K.; KIM, W. J. The effect of 0.5 wt.% Ca addition on the hot compressive characteristics and processing maps of the cast and extruded Mg–3Al–1Zn alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 658, p. 157–169, fev. 2016.

LEE, D. B. High temperature oxidation of AZ31+0.3wt.%Ca and AZ31+0.3wt.%CaO magnesium alloys. **Corrosion Science**, v. 70, p. 243–251, maio 2013.

LIU, C. et al. Flammability and the oxidation kinetics of the magnesium alloys AZ31, WE43, and ZE10. **Corrosion Science**, v. 100, p. 177–185, nov. 2015.

MEZBAHUL-ISLAM, M.; MOSTAFA, A. O.; MEDRAJ, M. Essential Magnesium Alloys Binary Phase Diagrams and Their Thermochemical Data. **Journal of Materials**, v. 2014, p. 1–33, 30 abr. 2014.

NAGHDI, F. et al. Microstructure and high-temperature mechanical properties of the Mg–4Zn–0.5Ca alloy in the as-cast and aged conditions. **Materials Science and Engineering: A**, v. 649, p. 441–448, jan. 2016.

PRASAD, A.; SHI, Z.; ATRENS, A. Influence of Al and Y on the ignition and flammability of Mg alloys. **Corrosion Science**, v. 55, p. 153–163, fev. 2012.

SHIH, T.-S.; WANG, J.-H.; CHONG, K.-Z. Combustion of magnesium alloys in air. **Materials Chemistry and Physics**, v. 85, n. 2–3, p. 302–309, jun. 2004.

TAKENO, T.; YUASA, S. Ignition of Magnesium and Magnesium-Aluminum Alloy by Impinging Hot-Air Stream. **Combustion Science and Technology**, v. 21, n. 3–4, p. 109–121, fev. 1980.

TAN, Q. et al. Oxidation of magnesium alloys at elevated temperatures in air: A review. **Corrosion Science**, v. 112, p. 734–759, nov. 2016.

TEKUMALLA, S.; GUPTA, M. An insight into ignition factors and mechanisms of magnesium based materials: A review. **Materials & Design**, v. 113, p. 84–98, jan. 2017.

TERADA, Y. et al. A thousandfold creep strengthening by Ca addition in die-cast AM50 magnesium alloy. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 35, n. 9, p. 3029–3032, set. 2004.

ZHONG, Y.; YANG, M.; LIU, Z.-K. Contribution of first-principles energetics to Al–Mg thermodynamic modeling. **Calphad**, v. 29, n. 4, p. 303–311, dez. 2005.

ZHU, Q. et al. Towards development of a high-strength stainless Mg alloy with Al-assisted growth of passive film. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 5838, 3 out. 2022.

6 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Tarefas e/ou atividades	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre	5º Trimestre	6º Trimestre	7º Trimestre	8º Trimestre	9º Trimestre	10º Trimestre	11º Trimestre	12º Trimestre	13º Trimestre	14º Trimestre	15º Trimestre	16º Trimestre
Ano	2024			2025			2026			2027						
Disciplinas																
Revisão bibliográfica																
Cálculos termodinâmicos (Thermo-Calc)																
Produção das ligas																
Usinagem e corte dos lingotes																
Tratamentos térmicos de homogeneização																
Laminação a quente das ligas selecionadas																
Ensaio de tração																
Ensaio de oxidação																
Testes de dureza																
Caracterização microestrutural (MO, MEV-EDS, DRX e EBSD)																
Elaboração de artigos e tese																

Período aproximado do exame de qualificação

Período aproximado da defesa da tese