

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**LIGAS DE Mg APLICADAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA**

Breno Augusto Batista

**SÃO CARLOS - SP
2022**

Ligas de Mg Aplicadas na Indústria Automobilística

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: José Eduardo Spinelli

SÃO CARLOS - SP
2022



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Breno Augusto Batista

RA: 725693

TÍTULO: Ligas de Mg aplicadas na indústria automobilística

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 19/04/2022, 8h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. José Eduardo Spinelli	8,5	8,5
Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa	8,5	8,5
Média	8,5	8,5

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. José Eduardo Spinelli e Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

Dedico este trabalho a minha mãe que,
infelizmente, não pode estar aqui
fisicamente para comemorar comigo essa
conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família, especialmente ao meu pai, a minha irmã, minha madrinha por todo o suporte e incentivo durante toda a minha vida.

A mim, por toda força, disciplina e perseverança para alcançar meus objetivos.

A Letícia de Aquino Bagatta por toda a paciência, compreensão e apoio em todos os momentos. Sendo a minha companheira até nas situações mais difíceis.

Aos meus amigos de infância que estão comigo há muitos anos acompanhando de perto toda minha trajetória. Vocês são uma segunda família para mim.

Aos amigos durante todo o período de graduação na UFPel, UFSC-BNU e UFSCar. Em especial, ao Lucas Moura Martini e a Família Meio Ácido, entre tantos outros que participaram de alguma maneira em minha vida.

Ao professor José Eduardo Spinelli, pela orientação, suporte, comprometimento e compreensão durante o período do TCC, sendo excelente docente. Além disso, obrigado pelas boas conversas e por ser uma grande inspiração profissional e, também, um grande amigo.

Aos professores e funcionários do DEMa, pela excelência no ensino, por toda a transferência do alto nível de conhecimento e por todo o suporte necessário ao longo de toda a graduação.

Por fim, aos docentes das UFPel e UFSC-BNU que contribuíram, também, com seus ensinamentos compondo todo o conhecimento de engenharia de materiais que possuo.

“A verdadeira viagem de descobrimento
não consiste em procurar novas
paisagens, mas em ter novos olhos”
(Marcel Proust)

RESUMO

Cada vez mais a indústria automobilística está disposta e sujeita a implementar as novas tecnologias do mercado com o intuito de mitigar impactos ambientais tentando reduzir o consumo de combustíveis fósseis e verdes e, conseqüentemente, impactar na emissão de gases poluentes relacionados ao efeito estufa. A partir disso, a indústria automobilística começou a considerar materiais novos, alternativos e que sejam leves para compor certas partes dos veículos. Logo, com a implementação desses materiais mais leves haverá uma diminuição direta de peso nos veículos, minimizando o consumo dos combustíveis proporcionando maior autonomia e economia de combustíveis, sem que haja perda de desempenho e ainda assim podendo melhorá-lo. As oportunidades de redução de massa em aplicações estruturais automotivas são cada vez mais realizadas por meio da utilização de ligas leves, como as ligas de Mg, as quais possuem uma excelente relação resistência-peso. As melhorias constantes relacionadas a essas ligas e a leveza que elas podem proporcionar para os componentes automotivos servem como motivadores para os avanços tecnológicos a respeito do desenvolvimento de técnicas de extração e processamentos de Mg primário, aprimoramento de técnicas de processamentos convencionais, e até mesmo a criação de novos métodos de processamentos e novas ligas de Mg contendo elementos de terras raras ou livre deles. Tais melhorias estão vinculadas a propriedades superiores, tais como resistência mecânica, resistência à fluência e à corrosão de ligas de Mg em temperaturas elevadas e ambiente. Tais avanços a custos viáveis podem proporcionar o emprego das ligas de Mg em larga escala na indústria automobilística.

Palavras-chave: Ligas de Mg. Componentes de Mg. Indústria Automotiva. Terras Raras.

ABSTRACT

The automotive industry is more and more willing and subjected to deploy new technologies in the market to mitigate environmental impacts, trying to reduce the consumption of fossil and green fuels, and hence impacting on the emission of pollutant gases related to the greenhouse effect. From that, the auto industry started to account for new alternative lightweight materials to compose specific parts of the vehicles. Therefore, with the deployment of such lighter materials, there will be a direct decrease on the vehicle's total weight, minimizing the fuel consumption, providing higher autonomy and fuel saving, without losing performance and even being able to improve it. The opportunities of mass reduction in automotive structural applications are increasingly made by using light alloys, such as Mg ones, which have an excellent resistance-weight ratio. The constant improvements related to these alloys and the lightness they can provide for automotive components work as motivators for technological improvements regarding the development of extracting techniques and processing of primary Mg, refining conventional processing techniques, and even creating new processing methods and new Mg alloys containing rare earth elements or being free of them. Such improvements are linked to superior properties, such as mechanical resistance, fluency resistance and Mg alloys corrosion on high and room temperatures. These advances to viable costs can provide the usage of Mg alloys in large scale on the auto industry.

Keywords: Mg Alloys. Mg Components. Automotive Industry. Rare Earths.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produção mundial de Magnésio Primário em 1000 ton métricas de 2010 até 2021 (GARSIDE, 2022).....	14
Figura 2 - Requisitos básicos para os componentes dos veículos (DAVIES, 2012).....	17
Figura 3 - Relação entre massa do veículo e consumo de combustível (ELIEZER; AGHION; FROES, 1998).....	18
Figura 4 - Componentes à base de ligas de Mg na indústria automotiva (SEETHARAMAN; GUPTA, 2020).....	20
Figura 5 - Evolução temporal do uso de ligas de magnésio na indústria automotiva norte-americana (DAS, 2003).....	21
Figura 6 - Componentes de automóveis fabricados com ligas de Mg (a: bloco motor, b: módulo de coluna de direção, c: estrutura de porta, d: cárter inferior, e: volante, f: carter da caixa de velocidades, g: estrutura do banco, h: jantes ou aros) (KULEKCI, 2008).....	23
Figura 7 - Esquema de Fundição em Câmara Fria (CZERWINSKI, 2008).....	30
Figura 8 - Esquema e uma máquina de fundição sob pressão de câmara quente (CZERWINSKI, 2008).....	32
Figura 9 - Ligas de Mg mais empregadas (ESMAILY et al., 2017).....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes de ligas de magnésio e suas aplicações nos vários modelos de automóveis (KULECKI, 2008).....	22
Tabela 2 - Elementos de Ligas e suas influências em ligas de Mg (WANG <i>et al.</i> 2020).....	33
Tabela 3 - Ligas de magnésio e as suas aplicações (KULECKI, 2008).....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO.....	15
2. O CENÁRIO DAS LIGAS DE Mg NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA 4.0	16
2.1 CONTEXTO DE MATERIAIS LEVES PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	16
2.2 AS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DAS LIGAS DE Mg NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	19
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO EMPREGO DE LIGAS DE MAGNÉSIO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	23
2.4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES DO EMPREGO DE LIGAS DE Mg NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	24
3. PROCESSAMENTO DE LIGAS DE Mg PARA INDÚSTRIA	27
3.1 FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO (HIGH PRESSURE DIE CASTING).....	28
3.1.1 Fundição Sob Pressão em Câmara Fria	29
3.1.2 Fundição Sob Pressão em Câmara Quente	31
3.2 LIGAS FUNDIDAS DE Mg PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	32
4. ALTERNATIVAS PARA PROCESSAMENTO DE LIGAS DE Mg	36
4.1 REDUÇÃO DE CUSTOS NA PRODUÇÃO DE Mg PRIMÁRIO.....	36
4.2 APRIMORAMENTO DE ROTAS DE FUNDIÇÃO PARA LIGAS DE Mg.....	36
4.2.1 Fundição a Vácuo	37
4.2.2 Fundição por Compressão	38
4.2.3 Fundição por Espuma Perdida	38
4.2.4 Tixofundição	39
4.3 VIAS ALTERNATIVAS PARA PRODUÇÃO DE LIGAS DE Mg.....	39
5. PERSPECTIVAS DE LIGAS ALTERNATIVAS DE Mg	42
5.1 O FUTURO DAS LIGAS DE Mg.....	42
5.1.1 Ligas de Mg contendo Terras Raras	43
5.1.2 Ligas Forjadas de Mg contendo Terras Raras	45
5.1.3 Ligas Alternativas de Mg Sem Terras Raras	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

O magnésio é o segundo elemento da família dos metais alcalinos-terrosos, corresponde ao elemento da tabela periódica cujo símbolo químico é o Mg sendo o seu número atômico o 12, em sua forma metálica ele é brilhante e prateado. É o oitavo elemento mais abundante do planeta, pois ele está presente em cerca de 2% da crosta terrestre. No entanto, o Mg não pode ser encontrado na forma metálica na natureza devido ao seu baixo potencial de redução padrão. Ele é encontrado em matérias-primas minerais, como, dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$), magnesita (MgCO_3), bischofita ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), carnalita ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), serpentina ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e entre outros compostos químicos. Além disso, ele também pode ser encontrado na forma iônica Mg^{2+} , nas águas dos mares e oceanos. (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006)

As principais maneiras de obtenção do magnésio primário consistem em técnicas de redução térmica, ou métodos eletrolíticos. O primeiro método é executado sob aquecimento dos óxidos de magnésio com a presença de algum agente redutor. Para a realização desses processos de redução térmica usa-se, preferencialmente, a magnesita (MgCO_3) e a dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) (CZERWINSKI, 2008). Já os métodos eletrolíticos fundamentam-se em técnicas eletroquímicas como a eletrólise do cloreto de magnésio anidro, usando uma corrente elétrica contínua que circula através células eletroquímicas capaz de dissociar o magnésio na forma metálica, e o cloro em forma gasosa (KRAMER, 2001).

O magnésio elementar (Mg) foi descoberto pela primeira vez em 1755 pelo químico Joseph Black, a partir da criação da magnésia ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Já em 1808, o Sir Humphrey Davy, conseguiu isolar o metal enquanto ele realizava o experimento de decomposição com sulfato de magnésio em uma célula eletroquímica com um cátodo de mercúrio (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

Em 1833, Michael Faraday, ex-assistente de laboratório de Sir Humphrey Davy, consegue pela primeira vez produzir o magnésio primário puro por meio do método de eletrólise de cloreto de magnésio anidro fundido. A técnica de Faraday foi aprimorada por Robert Bunsen em 1852 para que fosse possível obter magnésio metálico em escala comercial (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

A ascensão do magnésio em nível industrial teve início no século XX, principalmente nos períodos da Primeira e Segunda Guerra Mundial, e também no

entre guerras. Na Primeira Guerra Mundial, devido ao seu potencial bélico, ele foi usado para aplicações, como pó, ou fita para lanternas, utilidades pirotécnicas, materiais bélicos como, sinalizadores, bombas incendiárias e munições. Todos esses produtos abasteceram as forças armadas dos países envolvidos (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006)

Durante o período entre guerras, a partir de muitas pesquisas e estudos, ele foi empregado como principal agente redutor de alumínio, e também foi usado para a fabricação de peças estruturais de aeronaves, navios, automóveis, peças fundidas, forjadas e até extrudadas (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

Foi na Segunda Guerra Mundial que as maiores quantidades de magnésio foram produzidas. Isso só foi possível devido à expansão e surgimento de indústrias voltadas para a produção do magnésio, estas que utilizavam rotas de extração baseadas em princípios eletrolíticos ou térmicos, sendo estas utilizadas até hoje (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

Após a Segunda Guerra houve uma queda na demanda do magnésio que foi retomada a partir de 1990 com o auxílio de pesquisas científicas para novas aplicações de engenharia na indústria automotiva, aeroespacial, eletrônica de consumo e até em biomedicina de implantes. Ele também passou a ser usado para construir várias aplicações comerciais de uso geral, como artigos esportivos, produtos domésticos e equipamentos de escritório (POWELL; KRAJEWSKI; LUO, 2021).

As ligas à base de magnésio vêm progressivamente atraindo grande atenção devido à sua abundância, baixas densidades e capacidades consideráveis de armazenamento de hidrogênio. Contudo, as aplicações práticas das ligas de armazenamento de hidrogênio à base de Mg ainda são seriamente prejudicadas por sua cinética lenta e características termodinâmicas relativamente estáveis. Atualmente, algumas estratégias vêm sendo utilizadas para ajustar as propriedades de armazenamento de hidrogênio de ligas à base de Mg, mas ainda são insuficientes para atender aos requisitos de aplicações industriais práticas. (OUYANG et al., 2020)

Os maiores produtores de magnésio metálico do mundo dos últimos 10 anos foram China, Estados Unidos da América, Israel, Brasil, Rússia, Cazaquistão, Ucrânia e Turquia. Dentre eles, o país que lidera a produção mundial é a China, a qual possui a maior jazida mineral para a produção primária desse elemento. Além de ser o maior

produtor é, também, o maior exportador de magnésio do mundo, representando mais de 80% da produção mundial de magnésio. Segundo as estatísticas, a produção de magnésio metálico da China em 2017 foi de 912.600 toneladas, e a produção em 2018 foi de 863 mil toneladas (WU; HAN; LIU, 2021).

A produção primária mundial estimada de magnésio totalizou 950.000 toneladas métricas em 2021. Segundo a figura 1, de 2010 até 2021, a produção mundial de magnésio primário atingiu o pico em 2019 em 1,12 milhão de toneladas métricas. Como resultado, o mercado global de magnésio deverá crescer a uma taxa de crescimento anual composta de 4,9% e atingir 1,6 milhão de toneladas (Mt) até 2027 (REPORT BUYER, 2022).

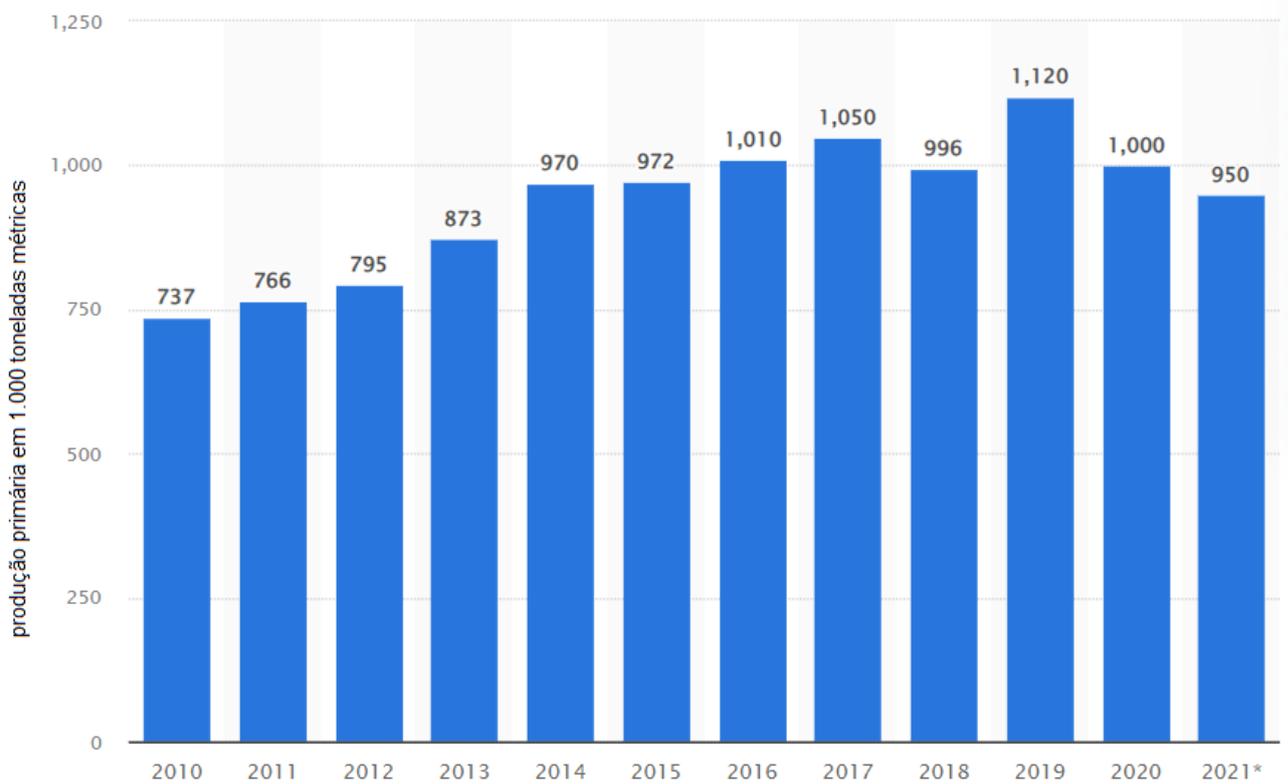


Figura 1- Produção mundial de Magnésio Primário em 1000 ton métricas de 2010 até 2021 (GARSIDE, 2022).

A demanda e os preços do magnésio flutuaram durante grande parte dos anos de 2020 e 2021 em resposta à pandemia do COVID-19 e, também, devido a crise energética enfrentada pela China. Tal crise afeta diretamente o mercado de magnésio

já que a extração e produção de Mg primário consome muita energia. Dessa maneira, o governo chinês exigiu que 35 das 50 indústrias de fundição do elemento permanecessem fechadas até o final de 2021 e, também, que as demais indústrias, operassem com metade da capacidade, causando muita preocupação na indústria automobilística ao redor do mundo, já que o magnésio é um dos principais elementos utilizados na fabricação ligas de Al. (MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2022, 2022)

A empresa brasileira, RIMA Industrial, a única produtora de magnésio primário do Hemisfério Sul, afirma que o magnésio é um importante elemento de liga usado na indústria do alumínio, principalmente na produção de peças automotivas (RIMA, 2022).

Na última década, o interesse da indústria automobilística pelo magnésio e suas ligas estimulou muitas pesquisas científicas em torno desse metal e suas ligas. Esse interesse está atrelado a uma demanda de produção de peças e componentes para reduzir o peso de um veículo. As ligas de magnésio preferenciais são usadas em fundição de peças estruturais, e que costumam ser fabricadas a partir de dois tipos de processamento, como a fundição e/ou conformação mecânica (RIMA, 2022).

A indústria automobilística usufrui do magnésio e suas ligas para a fabricação de pequenas peças, porém, fundamentais na diminuição de peso, e fabricação de automóveis cada vez mais leves e com design mais arrojado, sendo uma possível alternativa no emprego de peças ou componentes pesados (MORDIKE; EBERT, 2001).

Apesar do crescente interesse, e do alto volume de produção de Mg primário na última década, ainda há muitos desafios a serem superados para que as vantagens de suas ligas sejam capazes de alcançar o aproveitamento e desempenho desejados nas aplicações industriais em grande escala. Esse subaproveitamento ocorre devido a questões estruturais das ligas de Mg e das restrições e dificuldades de processamento destas ligas que, conseqüentemente, elevam o custo de produção de materiais funcionais para a indústria automobilística de volume. Estruturalmente as ligas de Mg apresentam baixa resistência mecânica, fraca resistência à corrosão, e a plasticidade dessas ligas relativamente inferior quando comparadas com ligas de alumínio e aços (LUO, 2013).

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo revisar, avaliar e resumir a relevância do Mg e das aplicações de suas ligas frente a indústria automobilística, podendo contribuir significativamente para maior aplicação dessas ligas, redução de custos e desenvolvimento de pesquisas futuras. No presente trabalho de conclusão de curso são abordadas as vantagens e limitações atuais, as oportunidades e desafios tecnológicos e, por fim, perspectivas futuras das ligas de Mg na indústria automotiva.

2. O CENÁRIO DAS LIGAS DE Mg NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA 4.0

2.1 CONTEXTO DE MATERIAIS LEVES PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Uma das principais tendências da indústria automobilística está relacionada com a produção de veículos cada vez mais eficientes a nível de desempenho, mais baratos e que sejam, também, mais sustentáveis a partir da redução no consumo de combustíveis fósseis para seu funcionamento. Nesse contexto, há uma crescente procura no mercado por materiais cada vez mais leves capazes de propiciar uma melhoria nos componentes destes automóveis para que haja uma economia de combustível, com o objetivo de aumentar a eficiência energética sem que haja perda de autonomia. Dessa forma, podendo potencializar a sua performance e com emprego de designs cada vez mais arrojados (CZERWINSKI, 2021).

A indústria de automóveis vem investindo a décadas no emprego de materiais poliméricos e de ligas metálicas de alumínio para a produção de veículos a fim de contribuir para a redução de peso e, conseqüentemente, a economia de combustível, atendendo aos requisitos básicos dos consumidores. Porém, a cada ano que passa as fábricas de automóveis estão cada vez mais interessadas nas ligas de magnésio para que sejam aplicadas em suas produções devido aos benefícios relacionados, principalmente à leveza (DIERINGA; KAINER, 2007). Uma das primeiras aplicações do magnésio e suas ligas para o mercado consumidor sem fins bélicos foi realizada pela Volkswagen, durante a confecção de carros do modelo Fusca, projetado por Ferdinand Porsche, no qual foram utilizados aproximadamente 20 kg de ligas de magnésio em cada automóvel deste modelo (FRIEDRICH; SCHUMANN, 2001).

A evolução na quantidade média de magnésio utilizada por carro vem crescendo ao longo dos anos, em 2005 era por volta de 3 kg, em 2010 passou a 20 kg, e em 2015 foi de 50 kg. Toda essa expansão proporcionou, também, um aumento relevante de pesquisas e estudos sobre o magnésio e suas ligas, tendo como foco principal a redução de peso, economia de energia e redução do impacto ambiental (KULEKCI, 2008). Além de agregar aos requisitos técnicos, ecológicos e econômicos, outros requisitos básicos para os componentes dos automóveis devem ser atendidos de acordo com seus respectivos objetivos, sendo tais requisitos indicados na Figura 2 (SCHUMANN, 2005):

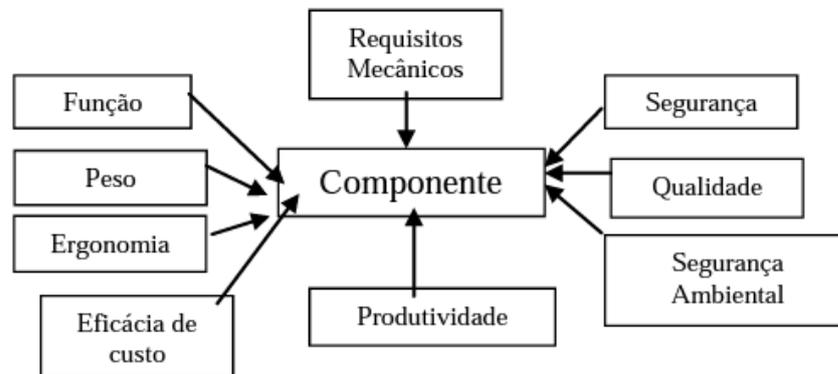


Figura 2 - Requisitos básicos para os componentes dos veículos (DAVIES, 2012).

Desta forma, todas essas exigências do mercado global forçam as principais fabricantes de veículos a concentrar seus esforços na diminuição do peso do veículo e, dessa forma, limitando a quantidade de emissões de gases poluentes devido aos requisitos legislativos e dos consumidores para veículos mais seguros e sustentáveis. Tais exigências do mercado global forçam a indústria automotiva a fabricar carros mais leves, mais sustentáveis, mais seguros e mais baratos (FRIEDRICH; SCHUMANN, 2001).

Sabe-se que a emissão de CO₂ é diretamente proporcional ao consumo de combustível. O peso do carro tornou-se o requisito mais crucial nas avaliações de eficiência de projeto. Logo, a redução do peso dos veículos automotores em uma determinada quantidade impactará em um percentual semelhante de melhoria na economia de combustível, conforme o gráfico na Figura 3 (MICHALEK; PAPALAMBROS; SKERLOS, 2004).

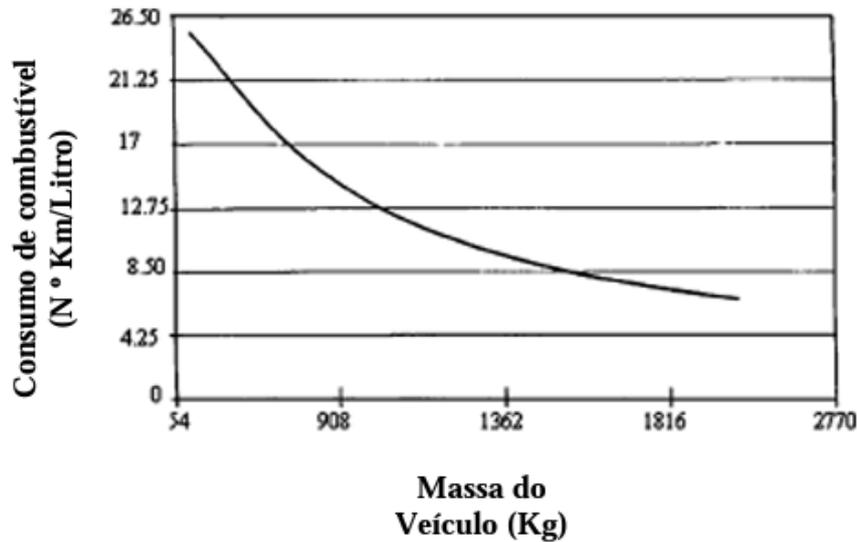


Figura 3 - Relação entre massa do veículo e consumo de combustível (ELIEZER; AGHION; FROES,1998).

As grandes montadoras de veículos utilizam materiais como: aços de alta resistência, bem como peças fundidas, extrudadas e laminadas a base de ligas de alumínio. Além desses materiais, também estão sendo empregados materiais compósitos poliméricos reforçados a fim de para reduzir o peso, porém há a necessidade de se obter reduções extras que podem ser conquistadas a partir de um maior uso do magnésio graças à baixa densidade desse e de suas ligas (KURIHARA, 1994).

No entanto, apesar do potencial de redução de peso, as ligas de magnésio permanecem sendo minimamente utilizadas. Por mais que o volume de pesquisas estejam crescendo, ainda há a necessidade da realização de pesquisas mais expressivas no que diz respeito à preparação das ligas de magnésio, desenvolvimento das ligas, processamento, montagem, desempenho em serviço, melhoria das propriedades mecânicas e redução de custos (JOOST; KRAJEWSKI, 2017).

Por enquanto a visibilidade que o magnésio e suas ligas possuem está diretamente atrelada à preservação ambiental, a qual depende, em grande medida, da indústria de veículos automotores, em particular na redução das emissões de CO₂ produzidas pelos veículos. Sendo assim, a redução de peso é a opção mais

eficaz, em termos de custos, para se obter um decréscimo significativo no consumo de combustível e de emissões de CO₂ (TAYLOR, 1978).

2.2 AS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DAS LIGAS DE Mg NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.

O Mg e suas ligas são pouco usados no setor, quando comparados com outros materiais como o aço e as ligas de alumínio. No entanto, devido às grandes demandas por soluções mais sustentáveis, as indústrias de transportes movem-se, principalmente, na direção de reduzir as emissões de gases estufa e para uma economia de combustível nos automóveis. Com isso, há uma busca por padrões de crescimento para a utilização de ligas de Mg (JOOST; KRAJEWSKI, 2017).

Partindo do conceito de incorporar mais as ligas de magnésio em veículos de transporte, as indústrias desejam atingir uma meta que cada automóvel deva conter 20 kg de peças ou componentes constituídos por ligas de magnésio, ao invés de empregar qualquer outro material alternativo. Sendo assim, em 25% dos 40 milhões de carros produzidos, calcula-se que a indústria automotiva venha a necessitar de 200000 toneladas de ligas de magnésio, exigindo um aumento de 50% da produção total mundial (KULEKCI, 2008).

As ligas de Mg podem estar presentes em partes estruturais dos automóveis, incluindo carroceria, chassis e componentes internos. Outras formas de empregar esses materiais podem ser na composição de painéis de instrumento, estruturas de volantes, blocos de cilindro, berços de motor, armações de teto, armações de assentos, caixas de transferência e etc. A grande maioria dessas aplicações está localizada na parte dianteira e superior dos veículos como pode ser visto na figura 4. Entretanto, outras peças e componentes não possuem viabilidade de produção devido aos altos custos, questões relacionadas à empregabilidade dos materiais em temperaturas elevadas, e o mais importante, ausência de desenvolvimento contínuo da competitividade e de soluções leves capazes de oferecer uma melhor proposta de valor agregado (POWELL; KRAJEWSKI; LUO, 2021).

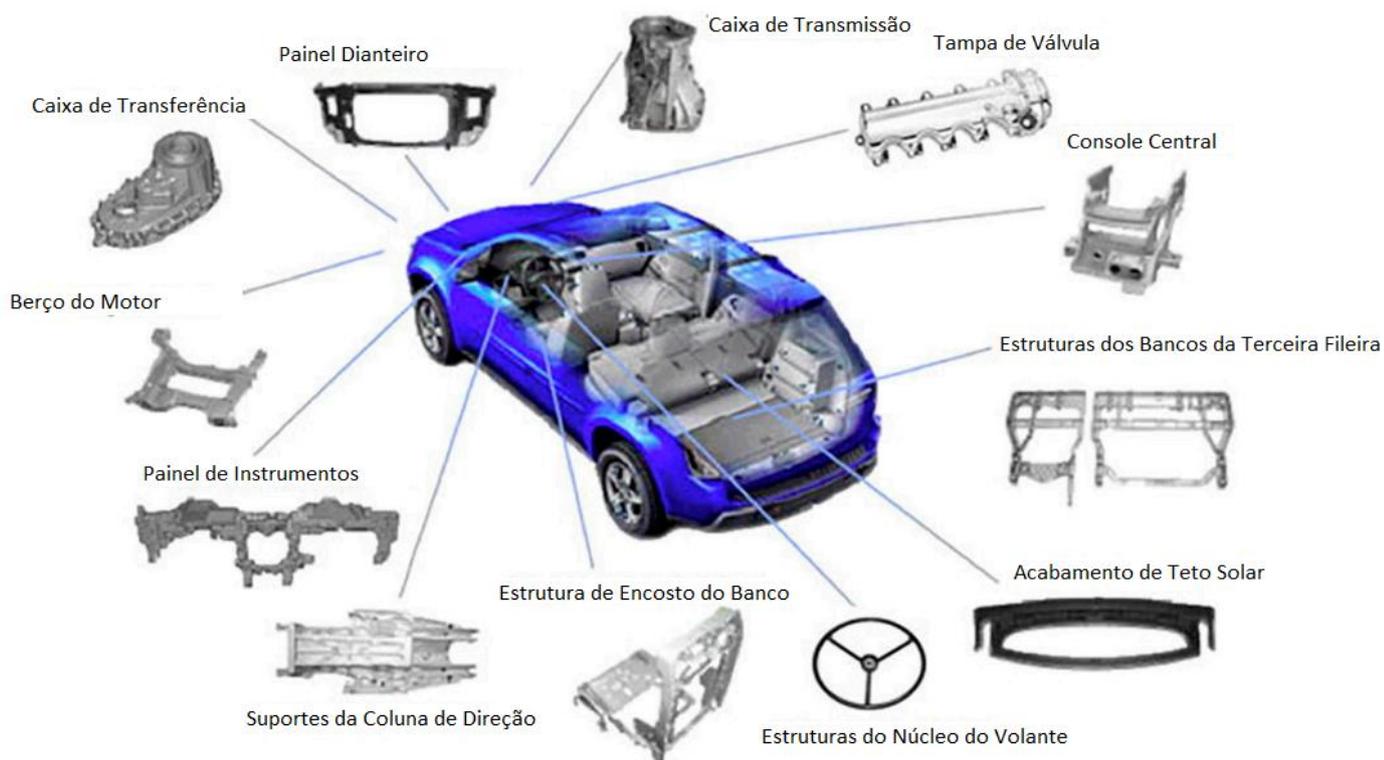


Figura 4 - Componentes à base de ligas de Mg na indústria automotiva (SEETHARAMAN; GUPTA, 2020).

Dentre as grandes marcas, a BMW se destacou ao fabricar um motor a gasolina empregando ligas de magnésio e ligas de alumínio, sendo considerado o motor mais leve do mundo. A empresa afirma que a motivação principal por optar pela liga de magnésio foi a redução de peso, sendo 24% mais leve que um motor convencional constituído apenas de alumínio. Além disso, foi considerado mais eficiente, uma vez que apresentou uma maior potência com o torque do motor mais elevado e, ainda assim, mais sustentável por apresentar uma diminuição do consumo de combustível diminuindo a emissão de CO₂. Desde a implementação dessa tecnologia em 1990 até meados de 2007, a BMW proporcionou uma diminuição de 30% no consumo de combustível (Bavarian Motor Works, 2007 *apud* KULECKI, 2008)

Outra grande alemã do mercado automobilístico, a Mercedes-Benz, se esforçou para desenvolver um novo tipo de transmissão automática a base de ligas de magnésio, denominada de 7G-Tronic, possibilitando o alcance de 7 velocidades sem que houvesse um acréscimo considerável de peso em seus veículos. Já a Audi, aplicou ligas de magnésio no seu modelo V8 Quattro, obtendo uma redução relativa

de 5kg no peso do motor em relação aos outros modelos Audi de oito cilindros (Blawert; Hort; Kainer, 2004 *apud* KULECKI, 2008)

A Ford optou por trocar peças e componentes feitos de aço tubular, alumínio extrudado e plástico moldado por ligas de magnésio de fundição AM-60. Enquanto a General Motors (GM) confeccionou rodas à base de ligas magnésio para o modelo Corvette desde 1998. A GM, foi além das rodas e investiu na produção do painel de instrumentos para o modelo GM H-van, fabricado em liga de magnésio com um peso de 12 kg, proporcionando uma redução de peso de 50% quando comparado ao mesmo painel feito em aço. Todas as inovações e aplicações realizadas pelas indústrias automobilísticas norte-americanas a partir de 1990 resultaram em um crescimento anual de 15% no emprego das ligas de magnésio, atingindo uma média de 4,1 kg por automóvel em 2002. Toda evolução da aplicação das ligas de magnésio pode ser observada no gráfico temporal apresentado na figura 5 (DAS, 2003):

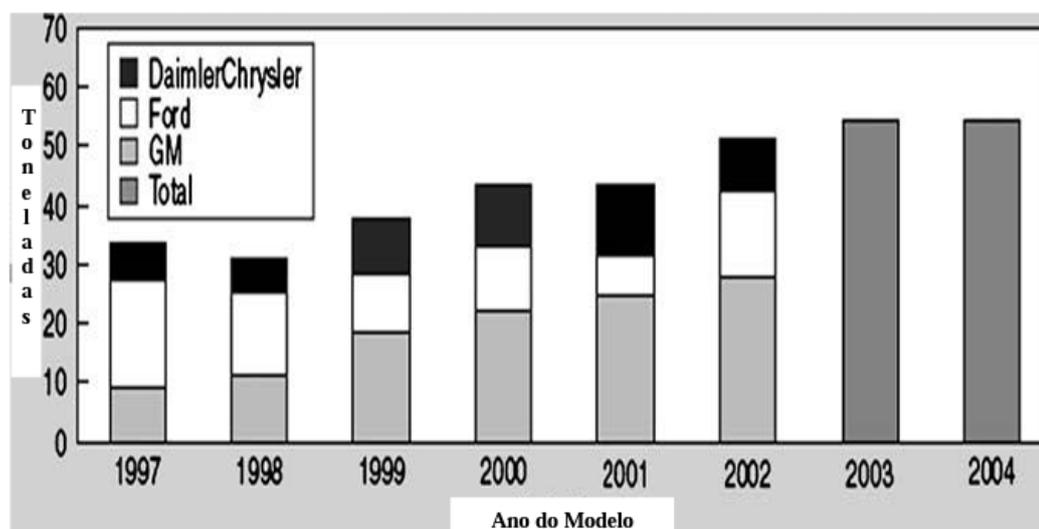


Figura 5 - Evolução temporal do uso de ligas de magnésio na indústria automotiva norte-americana (DAS, 2003).

A Tabela 1 contém informações adicionais dos vários componentes de automóveis constituídos por ligas de magnésio que são utilizados, e também, mostrando a montadora e o modelo do veículo associados. Já a figura X traz uma melhor visibilidade dessas peças e componentes.

Componente	Fabricantes e modelos dos automóveis
Bloco motor	BMW: motor de combustão de 6 cilindros mais leve, com mais potência e com mais duração. O primeiro bloco motor fabricado com a liga AJ62 (Mg-Al-Sr).
Estrutura do volante de direção	Ford (Ford Thunderbird, Cougar, Taurus, Sable), Chrysler (Chrysler Plymouth), Toyota, BMW (MINI), Lexus (Lexus LS430).
Estrutura dos bancos	GM (Impact), Mercedes-Benz (Mercedes Roadster 300/370/500 SL), Lexus (Lexus LS430)
Painel de instrumentos	GM, Chrysler (jeep), Ford, Audi (A8), Toyota (Toyota Century)
Jantes / Aros	Toyota (Toyota 2000GT, Toyota Supra), Alfa Romeo (GTV), Porsche AG (911 Serie)
Cabeça do cilindro	Dodge (Dodge Raw), Honda Motor (City Turbo), Alfa Romeo (GTV), AutoZAZ-Daewoo, (Tavria, Slavuta, Daewoo-Sens), Honda, BMW, Ford, Isuzu, Volvo Motors (LCP), Chrysler
Caixa de embreagem	AutoZAZ-Daewoo (Tavria, Slavuta, Daewoo-Sens), Volvo Motors (LCP),Alfa Romeo (GTV)
Cárter da caixa de velocidades	AutoZAZ-Daewoo (Tavria, Slavuta, Daewoo-Sens), Volvo Motors (LCP), Porsche AG, (911 Serie), Volkswagen (Volkswagen Passat), Audi (A4,A6), Mercedes-Benz
Cárter inferior	Chrysler (jeep), Alfa Romeo (GTV), GM (Oldsmobile), McLaren Motors (F1-V12)
Bloco de cilindro	GM (Pontiac Gran AM, Corvette)
Coletor de admissão	GM (motor V8 North Star), Chrysler
Sistema de admissão de ar	BMW (motor V8)
Barras de direção	GM (LH Midsize)
Corpo da bomba de óleo	McLaren Motors (F1-V12)
Caixa de controle de transmissão	AutoZAZ-Daewoo(Tavria, Slavuta, Daewoo-Sens)
Suportes para o compressor do sistema de climatização, bomba de direção	Chrysler, Volkswagen (Volkswagen Lupo)

Tabela 1 - Componentes de ligas de magnésio e suas aplicações nos vários modelos de automóveis (KULECKI, 2008)



Figura 6- Componentes de automóveis fabricados com ligas de magnésio (a: bloco motor, b: módulo de coluna de direção, c: estrutura de porta, d: Cáster inferior, e: volante, f: carter da caixa de velocidades, g: estrutura do banco, h: jantes ou aros) (KULEKCI, 2008)

2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO EMPREGO DE LIGAS DE Mg NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Dentre todos os materiais metálicos estruturais utilizados atualmente nas grandes áreas da engenharia, o magnésio se destaca sendo um dos elementos mais

leves devido a sua densidade de $1,74 \text{ g/cm}^3$, sendo aproximadamente 33% mais leve que o alumínio(Al) e 75% mais leve que o aço. Além dele muito leve, ele é paramagnético, possui elevada resistência à fadiga e boas propriedades amortecedoras (DAVIES, 2012).

Segundo Mordike e Ebert, a disponibilidade e densidade do magnésio não são as suas únicas vantagens para serem aproveitadas pela indústria de automóveis. Há outras vantagens como alta resistência específica (relacionada à baixa densidade), possui boas características de lingotamento (particularmente em operações de fundição sob alta pressão), pode ser torneado, fresado em alta velocidade, e tem boa soldabilidade (MORDIKE; EBERT, 2001).

Uma outra vantagem das ligas de Mg relativamente a outras ligas metálicas é a sua baixa temperatura de fusão (da ordem dos 650°C a 680°C , dependendo da liga), o que implica uma menor energia necessária para fundir uma liga de magnésio (KAINER, 2006).

Frequentemente, as ligas de magnésio têm sido empregadas, assim como materiais poliméricos, em diversos tipos de aplicações estruturais associadas à redução de peso. No entanto, em comparação com os plásticos, geralmente apresentam superioridade concernente às propriedades mecânicas, uma maior resistência ao envelhecimento, superior condutividade térmica e elétrica, sendo ainda mais facilmente recicláveis (MORDIKE; EBERT, 2001).

Apesar do destaque em potencial das ligas de magnésio no mundo dos metais para diminuir significativamente o peso de um automóvel, o seu uso em aplicações automotivas fica muito atrás do alumínio e do aço. O emprego do magnésio e de suas ligas é limitado devido ao seu baixo módulo de elasticidade, a sua baixa trabalhabilidade a frio(acima de 200°C), sua tenacidade limitada, resistência restrita e a resistência à fluência em altas temperaturas. Além das propriedades mecânicas, há outras desvantagens, como a alta reatividade química com baixa resistência à corrosão (dependendo do das condições ambientais de aplicação), necessitando de um revestimento para proteção (MORDIKE; EBERT, 2001).

2.4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES DO EMPREGO DE LIGAS DE Mg NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Provavelmente a principal barreira tecnológica para a expansão das ligas de magnésio para o setor automobilístico envolve o forjamento destas ligas. Tal processamento é mais desafiador do que outros metais e suas ligas devido principalmente à necessidade de se manter uma alta temperatura de deformação espacialmente em todos os pontos do forjamento. Isso significa que as matrizes precisam ser aquecidas e mantidas a uma temperatura mínima (tipicamente 200-250°C) durante a operação de forjamento (MORDIKE; EBERT, 2001).

Atualmente, existem poucas fábricas de forjamento especializadas na produção de peças forjadas de liga de magnésio. Parte da razão para isso é a falta de prensas de forjamento com capacidade de aquecer as matrizes durante o forjamento, juntamente com a falta de pessoal experiente para a fabricação de componentes dessas ligas. Para melhorar as condições de conformação a quente para forjamento de liga de magnésio, vários agentes lubrificantes, como grafite coloidal, dissulfeto de molibdênio, óleos minerais, ceras e gorduras são usados. Nos últimos anos, observa-se uma tendência de substituição de peças fundidas por produtos forjados à base de ligas de magnésio, pois estas garantem propriedades mecânicas e funcionais superiores (DZIUBIŃSKA *et al.*, 2016).

Outro grande desafio a ser superado está relacionado ao alto risco de inflamabilidade do magnésio. Dessa forma, a utilização das ligas de magnésio para produção de peças e componentes nas indústrias implica no risco de incêndio que pode ocorrer durante preparação e fusão, além dos processos de usinagem e corte, devido ao baixo do ponto de fusão destas ligas (SHI; SONG; ATRENS, 2006).

Durante o desbaste, os cavacos geralmente são espessos e provavelmente não esquentam o suficiente para acender. No entanto, os cavacos finos produzidos nas operações de acabamento são mais propensos a aquecer e inflamar. Da mesma forma, o pó gerado pode inflamar, até explodir, se aquecido a temperaturas de fusão. O perigo de incêndio pode ser eliminado evitando cortes finos, ferramentas cegas, evitando altas velocidades de corte, usando o design adequado da ferramenta para evitar o acúmulo de calor, evitando o acúmulo de cavacos. A refrigeração durante a usinagem não pode ser realizada, pois reduz o valor residual do sucata e aumenta o risco de incêndio (NIU *et al.*, 2006).

A soldabilidade das ligas de Mg pode também apresentar risco de incêndio se o metal quente fundido estiver em contato com o ar. Para ultrapassar este problema,

a solda deve ser executada em atmosfera de gás inerte. Durante a solda podem ocorrer distorções, em comparação com a solda de outros metais devido à elevada condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica das ligas de magnésio, caso não sejam tomadas as devidas precauções (Welding Magnesium, 2007 *apud* KULECKI, 2008)

Outro desafio para as ligas de magnésio é a reatividade. O magnésio é um metal reativo, por isso não é encontrado no estado metálico na natureza. Geralmente é encontrado na natureza em forma de óxido, carbonato ou silicato, muitas vezes combinados com cálcio. A consequência dessa alta reatividade química é, portanto, uma resistência à corrosão inerentemente baixa. Um dos principais passos para melhorar a resistência à corrosão é trabalhar com ligas de magnésio de alta pureza (ESMAILY *et al.*, 2017).

As ligas de Mg contendo elementos de terras raras são promissoras, por proporcionarem vantagens nas propriedades mecânicas dessas ligas em temperatura ambiente e elevadas, além disso elas apontam uma resistência à corrosão equivalente à das ligas de alumínio de elevado grau de pureza (CALADO; CARMEZIM; MONTEMOR, 2022).

Apesar das vantagens de usar terras raras como elementos de liga, a adição deles pode prejudicar técnicas de processamento que muitas vezes resultam em composição não homogênea e, portanto, problemas relacionados ao desempenho na liga final. Além disso, o custo dos elementos de terras raras pode ser muito alto, devido ao fato de que as reservas globais desses elementos são limitadas (PAN; YANG; CHEN, 2016).

3. PROCESSAMENTO DE LIGAS DE Mg PARA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

No contexto de diminuição de peso e inovação, as ligas de magnésio utilizadas na indústria automobilística têm certa importância nesse mercado e nas últimas décadas estão sendo amplamente estudadas para novas aplicações, além de aprimorar as ligas já existentes para finalidades já existentes no ramo. A redução de peso dos componentes é uma das soluções a curto prazo mais próximas para ajudar a indústria automotiva e que reflete diretamente nos quesitos de consumo de combustível, performance, sustentabilidade e, conseqüentemente, na sua competitividade no mercado, além de atender às novas diretrizes do setor, aumentando o interesse pelas ligas de magnésio. O processamento mais importante e largamente utilizado na produção dessas ligas é a fundição sob pressão e que será detalhado adiante (PETER, 2015).

Outros processos de fundição, como gravidade, molde permanente e fundição de baixa pressão também podem ser adaptados para as ligas de magnésio, embora esses métodos de fundição tenham sido desenvolvidos para ligas de Al e, portanto, precisam ser modificados para compensar a maior contração das ligas de Mg. Esses processos ainda são, no entanto, importantes para produção de componentes de ligas de Mg devido à necessidade de grandes peças vazadas para subsistemas estruturais, como blocos de motores, que fornecem maior eficiência de massa. O manuseio do metal fundido, transferência do fundido com turbulência mínima, refinamento de grão, revestimento de moldes matriz, e parâmetros de fundição precisam ser desenvolvidos especificamente para ligas de magnésio para extrair ao máximo suas propriedades intrínsecas através destes processos de fundição (LUO, 2013).

Os processos de fundição para ligas de Mg são capazes de reduzir o peso total da peça, vibração e ruído, enquanto melhora a precisão dimensional e a repetibilidade. A fundição sob pressão de ligas de magnésio resulta em melhor alongamento específico e vida útil mais longa se comparado com resultados em ligas de Al. Apesar das técnicas de fundição serem as mais adequadas e eficazes para a fabricação de componentes automobilísticos, o alto custo e a quantidade limitada de ligas a base de Mg são grandes barreiras para a expansão do uso de ligas de magnésio na indústria automobilística (DAS, 2003).

Apesar dos métodos de fundição serem os mais utilizados para as ligas de

magnésio na atualidade, outros tipos de processamentos tiveram a sua devida importância ao longo da história das ligas de Mg. Historicamente, o magnésio foi um metal relevante para construções e foi usado para aviões militares alemães desde a Primeira Guerra Mundial e extensivamente durante a Segunda Guerra Mundial, tais aviões possuíam peças forjadas e extrudadas (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006b).

Desde o início do século XXI, a extrusão para produtos a base ligas de Mg representava menos de 1,5% da produção anual em 2004, e permanece menor que 3% em 2013. Por outro lado, aproximadamente 25% dos produtos semi-acabados de liga de Al são produzidos por extrusão e amplamente adotados em aplicações de infraestrutura, automotivas e aeroespaciais (POLMEAR *et al.*, 2017).

A extrusão das ligas de Mg é restrita por algumas barreiras relacionadas às propriedades do extrudado como, baixa resistência mecânica, baixa resistência à corrosão, baixa conformabilidade e todas essas propriedades são inferiores quando comparadas com perfis extrudados de Al (BETTLES; BARNETT, 2012).

Outras dificuldades para utilização desse processo estão relacionadas a viabilidade econômica desse processo para algumas ligas de Mg que contém em sua composição elementos de liga que são caros. Além disso, a velocidade de extrusão é um outro ponto crítico, já que apenas algumas ligas de Mg são capazes de serem extrudadas em velocidades altas o suficiente para serem viáveis. As velocidades de saída da matriz relatadas para Mg estão na faixa de 20–30m/min⁻¹ para perfis básicos das chamadas ligas fáceis de extrudar, como a AZ31 e ZM21, em contraste, para as ligas de Al convencionais as velocidades de extrusão podem ser aproximadamente 5 ou 10 vezes mais rápidas. Já para as ligas de Mg difíceis de extrudar, como AZ61 e ZK60, ou para extrusão com seções mais complexas em qualquer perfil extrudado, a velocidade de extrusão das ligas de Mg nominalmente cai por um fator de 10 ou mais. Dessa forma, o uso da extrusão para ligas de Mg é acompanhado por taxas de produção significativamente mais baixas e menor custo-benefício de produtos extrudados em comparação com extrusões de ligas de Al (ZENG *et al.*, 2018).

3.1 FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO (HIGH PRESSURE DIE CASTING)

A fabricação de componentes utilizando ligas de Mg por fundição sob pressão

é uma técnica muito usada pela indústria automobilística para a produção de peças e componentes de diferentes *designs*, explorando geometrias simples e complexas de maneira ágil, devido à alta velocidade de processamento. Além disso, a fundição sob pressão em termos de projeto acaba sendo a mais indicada para linhas de produção que utilizam ligas de metais leves como, por exemplo, aquelas baseadas no alumínio e no magnésio. Este último que se destaca pelas propriedades de enchimento do molde, as quais são extremamente favoráveis para este processo. Portanto, esta é uma técnica viável para a fabricação de grandes peças fundidas com estruturas complexas e paredes finas. A fundição sob pressão pode ser classificada como fundição sob pressão com câmara quente e fundição sob pressão com câmara fria (CZERWINSKI, 2008).

A principal desvantagem da fundição sob alta pressão está relacionada ao alto nível de porosidade devido aos gases aprisionados resultantes da injeção de metal fundido em velocidades muito altas durante a fundição. Caso haja seções de parede fina, menores que 2,5 mm de espessura, o problema da porosidade é menos sério, não impactando, significativamente, as propriedades mecânicas. Já quando os produtos apresentam paredes mais espessas o efeito da porosidade nas propriedades mecânicas é mais grave, principalmente se as propriedades exigidas forem a rigidez e/ou durabilidade em aplicações estruturais críticas, especialmente se necessitarem de ductilidade e resistência à fadiga (LUO, 2013).

3.1.1 Fundição Sob Pressão em Câmara Fria

Nesse processo de fundição, a liga de Mg fundida é injetada sob alta pressão (35 - 140 MPa) e em alta velocidade (5 - 10 m/s) em um molde refrigerado, de forma que essa pressão dure até que toda a peça esteja solidificada. Geralmente, os moldes utilizados nesse processo devem estar nas condições necessárias de lubrificação para que quando o componente for ejetado não ocorram danos que prejudiquem a qualidade superficial da peça, mantendo a alta produtividade sem atrasos (VINARCIK, 2003).

Um esquema desse processo é mostrado na figura 7:

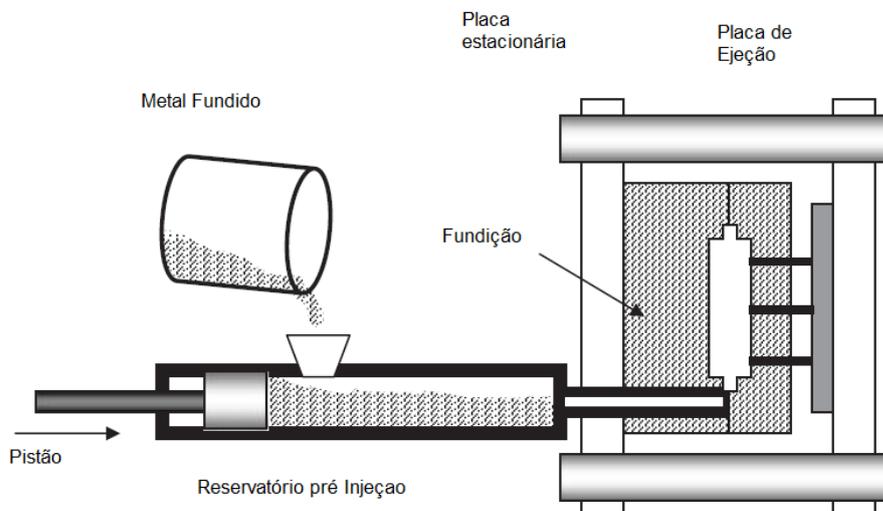


Figura 7 - Esquema de Fundição em câmara fria (CZERWINSKI, 2008).

A maioria dos fundidos de magnésio usados em automóveis são produzidos através do processo de fundição em câmara fria. As peças que costumam ser produzidas por esse método são, painel de instrumentos, suporte do radiador, berço do motor, estrutura do assento, bloco do motor, caixa de transmissão e cárter de óleo (LUO, 2013).

Todo o ciclo de produção para 1 peça é rápido, leva cerca de 1 minuto, logo, esse ciclo curto na confecção de cada peça reduz o tempo de contato das ligas de Mg fundidas com a matriz e o ar, minimizando as chances de reação. A rápida injeção faz com que seja possível a produção de peças grandes com seções finas. Além disso, é um método que apresenta rápidas taxas de solidificação dependendo da seção transversal. Tal resfriamento rápido permite a obtenção de grãos muito finos, principalmente na superfície da peça. Graças a essas vantagens, nota-se que o processo de fundição sob pressão em câmara fria para ligas de magnésio e para um grande volume de produção, é um método economicamente vantajoso (LUO, 2013).

A fundição sob pressão em câmara fria apresenta certas limitações. Devido às altas taxas de injeção, o volume de poros é significativo, o que exclui o produto fundido do tratamento térmico subsequente. Fundidos de paredes finas com longas distâncias de fluxo apresentam variação nas propriedades mecânicas. Em particular, a

resistência mecânica e a ductilidade diminuem com o aumento da distância de vazamento. Isso significa que a última área preenchida do fundido exibe propriedades mecânicas inferiores (CZERWINSKI, 2008).

3.1.2 Fundição Sob Pressão em Câmara Quente

A fundição sob pressão em câmara quente diferentemente da câmara fria, significa que o metal fundido é transportado diretamente para a matriz por meio de um canal aquecido chamado “pescoço de ganso”, minimizando assim a perda de calor. Para conseguir isso, uma parte significativa do sistema de injeção de metal é imerso no metal fundido durante toda a operação, possibilitando que o material percorra uma distância curta e atinja um tempo de ciclo reduzido e, além disso, contribui para que após cada ciclo de injeção, o metal fundido seja retornado de volta para o pescoço de ganso. Outra vantagem deste método é a limitação do contato do metal fundido com o ar, reduzindo ou eliminando assim a formação de óxidos (VINARCIK, 2003).

A pressão de injeção do metal fundido é menor na fundição em câmara quente do que na fundição em câmara fria, devido a alta temperatura constante em que o dispositivo se encontra, afetando principalmente o pistão e o bocal, e isso restringe o tamanho dos componentes fabricados. Geralmente, as peças baseadas em ligas de magnésio que são produzidas ficam restritas a tamanhos pequenos, com peso variando entre 3 kg a 6 kg dependendo do sistema. A exemplo disto a indústria automotiva costuma utilizar esse método para produzir volantes, colunas de direção e caixas de airbag (CZERWINSKI, 2008). Uma representação do dispositivo pode ser vista na Figura 8.

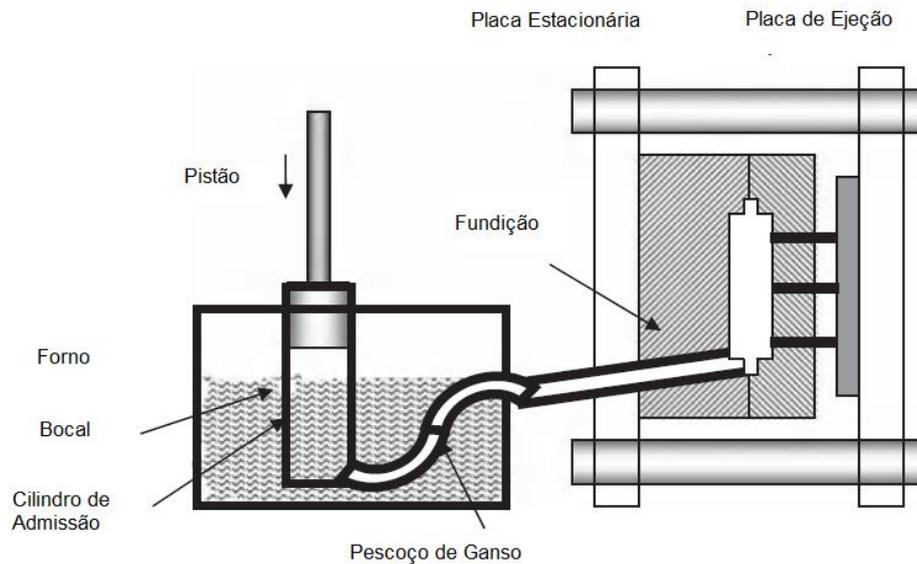


Figura 8 - Esquema de uma máquina de fundição sob pressão de câmara quente (CZERWINSKI, 2008).

3.2 LIGAS FUNDIDAS DE Mg PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

As ligas de magnésio podem ser classificadas em dois grupos a partir da sua composição. Um deles inclui as ligas que utilizam elementos mais comerciais como alumínio, zinco, cálcio, manganês, berílio, lantanídeos e etc. O segundo grupo é composto por ligas de magnésio que possuem elementos de liga como, terras raras, zinco, tório ou prata, todas contendo ainda um pequeno teor de zircônio. (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006)

O zircônio é essencial já que permite obter um material com tamanho de grão reduzido e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas. Estas ligas apresentam assim melhor comportamento mecânico a altas temperaturas, mas a utilização de elementos de liga mais caros combinado com tecnologia especializada para sua produção implica em preços mais elevados (STJOHN *et al.*, 2005).

A tabela abaixo mostra os elementos de liga que podem ser adicionados ao magnésio e seus respectivos efeitos.

Elemento de liga	Influência nas propriedades da liga de Mg
Alumínio (Al)	Aumento da dureza, resistência e maleabilidade
Berílio (Be)	Reduz a oxidação da superfície do fundido
Cálcio (Ca)	Melhora a resistência à corrosão, resistência à fluência e refinamento de grão
Cério (Ce)	Aumenta a ductilidade e a taxa de endurecimento durante o trabalho
Cobre (Cu)	Aumenta a resistência em temperatura ambiente e alta temperatura. Reduz a ductilidade
Ferro (Fe)	Nocivo à resistência à corrosão. Aumenta a ductilidade e diminui a resistência
Lítio (Li)	Aumenta a ductilidade e diminui a resistência
Manganês (Mn)	Melhora a resistência à corrosão da água salgada
Molibdênio (Mo)	Aumenta a dureza, o módulo de Young e a ductilidade
Níquel (Ni)	Melhora a resistência ao escoamento e a resistência a tração. Reduz a resistência à corrosão
Neodímio (Nd)	Aumento de resistência mecânica
Silício (Si)	Melhora a fluidez
Prata (Ag)	Resistência a alta temperatura e aumento da resistência à fluência
Estrôncio (Sr)	Aumenta a resistência à fluência e à corrosão, refinamento de grão. Aumenta a massa óssea
Tório (Th)	A resistência à fluência é aumentada até 370 °C. Maior soldabilidade em ligas de zinco
Estanho (Sn)	Aumento de ductilidade se a liga conter com Al. Melhora resistência à corrosão e a resistência à compressão
Titânio (Ti)	Maior ductilidade e resistência ao escoamento
Ítrio (Y)	Melhor resistência à fluência e resistência a altas temperaturas
Zinco (Zn)	A tensão de escoamento é aumentada e a resistência à corrosão é melhorada
Zircônio (Zr)	Excelente refinador de grãos

Tabela 2 - Elementos de Ligas e suas influências em ligas de Mg (WANG *et al.* 2020).

Outra maneira de classificar as ligas de Mg pode ser feita com base no seu tipo de processamento, podendo ser categorizadas como ligas de magnésio fundido e ligas de magnésio forjadas. As ligas de magnésio produzidas através de fusão e empregos de moldes e outras técnicas de fundição são ligas fundidas. No passado recente, as ligas fundidas passaram a ser utilizadas para aplicações estruturais na indústria automotiva, com destaque para as ligas da séries AZ, AM, AS e AE, contidas na Tabela 3 (KAINER *et al.*, 2010):

Liga	Elementos de Liga	Uso	Propriedades básicas e aplicações
AZ91	9.0% Al, 0.7%Zn 0.13%Mn	Liga de fundição de utilização geral	Boa moldagem, boas propriedades mecânicas a T <150°C
AM60	6.0% Al, 0.15%Mn	Liga de fundição sob alta pressão	Maior tenacidade e ductilidade do que a AZ91, resistência ligeiramente inferior. Frequentemente utilizada em aplicações automóveis estruturais
AM50	Sistema Mg-Al	Liga de fundição de utilização geral	Boa resistência, ductilidade, propriedades de absorção de energia e moldagem.
AE44	Sistema terra rara Mg-Al	Liga de fundição de utilização geral	Melhor comportamento de deformação e moldagem do que a AE42
AE42	Porcentagem atômica Mg-4 Porcentagem atômica Al-2 de terras raras	Liga de fundição de utilização geral	Baixo nível de moldagem, bom comportamento de deformação
AS41	4.2%Al, 1.0%Si	Liga de fundição de utilização geral	Melhor resistência à deformação do que a AZ91 a altas temperaturas mas menor resistência
ZE41	4.2%Zn, 1.2% de Terras Raras, 0.7% Zr	Liga de fundição especial	A adição de terras raras melhora a resistência da deformação a temperaturas elevadas. Forte pressão
AM20	Sistema Mg-Al	Liga de fundição	Elevada ductilidade, tenacidade, fraca moldagem
MRI 153M	Sistema Mg-Al-Ca-Sr	Liga de fundição	Para aplicações a altas temperaturas até 150°C
MRI 230D	Sistema Mg-Al-Ca-Sr	Liga de fundição	Para aplicações a altas temperaturas até 190°C
AS 21	Sistema Mg-Al-Si	Liga de fundição	Para utilizar em temperaturas a mais de 120°C
AJ62	Sistema Mg-Al-Sr	Fundição sob alta pressão	Boa resistência térmica e mecânica, fundição superior, resistência à corrosão e comportamento de deformação

Tabela 3 - Ligas de magnésio e as suas aplicações (KULEKCI 2008).

Nos últimos anos, algumas ligas fundidas que ganharam destaque no mercado automobilístico, como a liga AZ91, comumente usada em fundição sob alta pressão, por apresentar boa resistência mecânica em temperaturas inferiores a 150°C, boa resistência à corrosão e capacidade de fundição superior. Ela representa aproximadamente 80% de componentes de fundição de ligas de Mg para aplicações acima de 95°C, como componentes do trem de força em automóveis e componentes mecânicos onde a tenacidade é mais importante do que a capacidade de deformação. Seu uso é limitado a componentes que não são prejudicados pela sua baixa resistência à fluência (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

Outras ligas bastante utilizadas pela indústria automobilística são as ligas da série AM, como a AM60, AM50 e AM20, as duas últimas possuem um teor inferior de

Al em relação à primeira. As ligas AM60 e AM50 possuem excelente ductilidade e absorção de energia, propriedades combinadas com boa resistência mecânica e fundibilidade. Os usos típicos são automotivos: armações de assentos, volantes, painéis de instrumentos, entre outros. Já a liga AM20, é uma liga reconhecida por sua ductilidade e resistência ao impacto, aplicações típicas para peças de segurança automotiva, onde é necessária a maior ductilidade possível (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

As ligas da série AE como, a AE42 e AE44 e da série AS como, a AS21 possuem boa resistência mecânica e resistência à fluência em temperatura ambiente e, além disso, apresentam boa resistência mecânica e resistência à fluência em temperaturas acima de 120°C. Elas também apresentam boa ductilidade e resistência à corrosão, porém ambas as ligas têm características de baixa moldabilidade e baixa resistência à fadiga. Dessa forma, tais ligas foram desenvolvidas para serem aplicadas na fabricação de trens de força do motor e berço do motor, onde a temperatura de operação é acima de 120°C. A adição de elementos terras raras às ligas de magnésio traz diversos benefícios nas propriedades desses materiais. Esses elementos são capazes de aprimorar as propriedades mecânicas dessas ligas em temperaturas ambiente e elevadas devido à precipitação de compostos intermetálicos Mg-TR (terras raras) estáveis (MARUYAMA; SUZUKI; SATO, 2002).

Contudo, devido ao alto custo de mercado desses elementos, a aplicação destas ligas restrita é às indústrias de tecnologia de ponta como, aeroespacial ou para outras aplicações que necessitam de boas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas ou onde é essencial obter-se um peso crítico (GUPTA; SHARON, 2010).

4. ALTERNATIVAS PARA PROCESSAMENTO DE LIGAS DE Mg

4.1 REDUÇÃO DE CUSTOS NA PRODUÇÃO DE Mg PRIMÁRIO

Na última década, os métodos mais utilizados para a produção de Mg metálico foram as rotas de reduções térmicas, dentre as existentes, o processo Pidgeon é dominante, devido à sua capacidade de produzir magnésio de alta pureza e a abundância de sua matéria-prima, a dolomita. No entanto, essa técnica consome grandes quantidades de energia por lote de produção e, tem altas emissões de gases de efeito estufa em comparação com outras rotas de produção de metal (WU *et al.*, 2021).

Estima-se que o impacto do aquecimento global da produção de magnésio metálico na China seja aproximadamente 60% maior do que a produção de alumínio. Dessa forma há uma busca por soluções mais eficientes e tecnologias de produção sustentável. Uma rota de produção alternativa identificada é a redução carbotérmica, onde a magnésia reage com o carbono para produzir magnésio e vapor de monóxido de carbono (RAMAKRISHNAN; KOLTUN, 2004).

As vantagens do processo são o baixo custo do agente redutor e o potencial para operação contínua. A fonte de carbono está prontamente disponível, como coque de petróleo, carvão vegetal e carvão. No entanto, os prejuízos ocorrem devido à reação inversa do vapor de Mg e do gás CO à medida que a mistura é resfriada, resultando em um pó fino de Mg contaminado com óxido de magnésio. Apesar disso, é possível realizar a separação do Mg do gás CO (BROOKS *et al.*, 2006).

Outra alternativa para mitigar os custos de produção de Mg metálico são as rotas aluminotérmicas, que oferecem opções atraentes em relação a outras rotas de produção. O alumínio é um agente redutor mais forte em comparação com o ferrosilício e o carbono. Este processo é viável se existir uma fonte barata de recursos de alumínio disponíveis. Por meio de uma abordagem de ciclo de vida, o processo também não é atraente porque a energia necessária para fornecer alumínio também é alta (WADSLEY, 2013).

4.2 APRIMORAMENTO DE ROTAS DE FUNDIÇÃO PARA LIGAS DE Mg

Nas últimas duas décadas, a maior parte do desenvolvimento concentrou-se em aplicações de fundição de paredes finas na indústria automotiva, aproveitando a excelente fundibilidade das ligas de magnésio modernas. Recentemente, a expansão contínua das aplicações de fundição de Mg automotivas, aeroespaciais, eletrônicas e elétricas levou à diversificação dos processos de fundição em fundição a vácuo, fundição de espuma perdida, tixofundição, fundição por compressão, que serão detalhados adiante (LUO, 2013).

4.2.1 Fundição a Vácuo

A fundição a vácuo é um processo inovador, onde a pressão reduzida criada na câmara de injeção e na cavidade do molde imediatamente antes da injeção, não deixa ar preso no fundido, permitindo a fabricação de peças fundidas de parede fina relativamente grandes com propriedades significativamente melhoradas. Os fundidos produzidos com este processo são atualmente direcionados para componentes que necessitem da ausência de poros e boas propriedades mecânicas por meio de tratamento térmico. A fundição a vácuo, portanto, amplia as capacidades da fundição convencional, preservando seus benefícios econômicos. Essa técnica já é popularmente aplicada em ligas de Al na América do Norte. (VINARCIK, 2003)

Há duas variações da técnica de fundição a vácuo, a fundição assistida a vácuo e a fundição a super vácuo. A primeira é utilizada pela empresa norte-americana Gibbs Die Casting (Henderson, KY), que usa vácuo para fundição de componentes de magnésio. Esse método utiliza um sistema de vácuo simples que pode ser usado no processo de fundição sob pressão com o objetivo de reduzir a porosidade dos componentes fundidos de magnésio. Dessa forma, peças confeccionadas por esse processo podem ser tratadas termicamente sem que haja formação bolhas. Segundo Luo, bolhas extensas foram observadas nas superfícies de peças fundidas convencionais após tratamento térmico, enquanto nenhuma bolha foi observada nas superfícies das peças fundidas assistidas a vácuo (LUO, 2013).

Já a fundição a super vácuo usufrui de sistemas avançados de monitoramento de vácuo para alcançar níveis de vácuo mais altos e avaliar o nível de vácuo durante todo o processo de enchimento e garantir que o sistema esteja funcionando

corretamente para ligas de Mg. Esse método fornece uma melhoria limitada no limite de escoamento, que é determinada principalmente pela composição química da liga e pelo tamanho do grão. Dessa forma, a ductilidade e o limite de resistência à tração final das peças fundidas a super vácuo para ligas AZ91D e AM60B são significativamente melhoradas em comparação com as propriedades convencionais de fundição sob alta pressão devido à porosidade reduzida nessas peças fundidas (SADAYAPPAN *et al.*, 2009).

4.2.2 Fundição por Compressão

A fundição por compressão pode ser executada de duas maneiras, pelo método direto ou pelo método indireto. Para ambas as técnicas de processos, o metal fundido é injetado nas cavidades de fundição com turbulência mínima e solidificado sob pressão muito alta, geralmente acima de 100 MPa, dentro dos moldes fechados (VINARCIK, 2002).

A diferença entre as duas técnicas ocorre pela posição dos equipamentos que realizam a compressão, o método direto é realizado na direção vertical, semelhante a uma prensa de forjamento. Enquanto a maneira indireta é mais semelhante à fundição convencional de alta pressão, usando máquinas verticais ou horizontais (KAINER; BENZLER, 2003).

A ausência de fluxo turbulento de metal, auxiliado pela alta pressão aplicada, pode suprimir a porosidade em fundidos por ambas as técnicas. A tendência à porosidade de contração também é reduzida usando um mínimo de superaquecimento no fundido durante a fundição. Além disso, as fundições de compressão mostram resistência mecânica e ductilidade superiores, devido à alta pressão aplicada que garante um forte contato entre o fundido e o molde e, portanto, taxas de resfriamento superiores durante a solidificação. Portanto, a fundição por compressão oferece uma boa alternativa para fazer fundições de paredes espessas de ligas de Mg (KAINER; BENZLER, 2003).

4.2.3 Fundição por Espuma Perdida

Outra técnica de fundição que pode ser uma alternativa para produções de componentes é o processo de fundição por espuma perdida, o qual possui algumas das vantagens exclusivas como tolerâncias dimensionais estreitas, consolidação de peças, alto rendimento de fundição, fácil limpeza de fundição, bem como a eliminação da linha de separação do molde, núcleos de areia e ligantes. Tal processo já é prontamente automatizado e usado na produção de peças fundidas de ferro fundido e alumínio, como blocos de motor e cabeçotes, tendo um forte potencial para componentes de ligas de magnésio. Os principais desafios do magnésio de fundição de espuma perdida em comparação com o ferro ou o alumínio têm sido seu menor teor de calor no deslocamento dos padrões de espuma e reatividade química com muitos materiais de espuma, revestimento e areia (LUO, 2013).

4.2.4 Tixofundição

Apesar da tixofundição apresentar os custos mais elevados associados à matéria-prima, os grânulos de magnésio, e pela falta de máquinas de moldagem de grande porte, dificultaram as aplicações automotivas deste processo. Com auxílio de pesquisas e desenvolvimento, esse método pode vir a ser uma alternativa para para o futuro dos componentes fabricados a partir ligas de Mg, já que ele é semelhante à fundição a vácuo, apresentando uma menor porosidade e uma melhor resistência à fadiga em relação à fundição convencional. Além disso, o processo já resultou em aplicações bem-sucedidas com ligas de Mg em indústrias de informática e eletrônica como, aplicações de carcaças para telefones celulares, câmeras e computadores (LEBEAU *et al.*, 2004).

4.3 VIAS ALTERNATIVAS PARA PRODUÇÃO DE LIGAS DE Mg

Embora o sucesso das ligas de Mg seja atribuído principalmente à fundição sob pressão, essas ligas fundidas apresentam deficiências inerentes, como porosidade intrínseca, e geralmente peças fundidas não podem ser tratadas termicamente, limitando o amplo uso de componentes fundidos pela indústria automobilística (LUO; SACHDEV, 2012).

Recentemente, os esforços estão concentrados em pesquisas e aplicações de ligas de Mg forjadas. O forjamento é um candidato promissor para a produção industrial de produtos forjados à base de magnésio com propriedades mecânicas superiores às daquelas das ligas fundidas de Mg. Os processos de forjamento geralmente são capazes de fabricar peças com melhores propriedades mecânicas do que as peças fundidas e apresentam fluxo microestrutural favorável na direção do carregamento se produzidos adequadamente. Isso se origina de uma redução de defeitos de fundição, fechamento de poros, refinamento e quebra de fases primárias, bem como refinamento de grão e fluxo de material durante a conformação. Forjados são projetados para resultar nas melhores propriedades mecânicas globais de todos os produtos de Mg (ASM HANDBOOK, 1990).

Os produtos forjados de Mg são predominantemente feitos de matéria-prima extrudada ou laminada, com o objetivo de aproveitar o tamanho de grão já refinado para as operações de forjamento. Assim, o comportamento melhorado do fluxo de material auxilia no preenchimento da matriz e é benéfico para a qualidade da superfície da peça produzida. Embora seja possível comprar material extrudado e chapas, o mercado é pequeno e a variedade de ligas disponíveis é ainda menor. O uso de material fundido dá mais liberdade de escolha no caso de seleção de liga e reduz o preço ao pular uma etapa de conformação, mas também tem desvantagens. Dependendo do processo de fundição aplicado e do tamanho da peça, o tamanho do grão e o número de defeitos podem aumentar, e também etapas adicionais de usinagem provavelmente serão necessárias (PAPENBERG *et al.*, 2020).

A principal restrição da implementação de forjados de Mg está relacionado com um ciclo de *feedback*, ou seja, a falta de material disponível em estoque promove uma escassez de *know-how*, que diminui conseqüentemente as aplicações possíveis e aumenta os preços dos produtos realizados, o que por sua vez amortece o interesse industrial (PAPENBERG *et al.*, 2020).

Dentre os diversos tipos de processamento de ligas de Mg forjadas, a extrusão é uma possibilidade para a produção de componentes longos, moldados ou de paredes finas em apenas um passe, que pode estender a faixa de aplicação de ligas de Mg (POLMEAR *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, um grande número de relatos sobre o processo de extrusão tem sido publicado, visando a obtenção de ligas de Mg extrudadas de alto

desempenho. Até o momento, não se sabe se a velocidade de extrusão das ligas de Mg pode ser melhorada para atingir velocidades tão altas quanto às adotadas em ligas de Al, chegando a velocidades superiores a $100\text{m}/\text{min}^{-1}$. Para alcançar altos níveis de extrudabilidade, são necessários elementos de liga que possam aumentar a linha solidus de temperatura da liga, como Ca, Mn, Sn e elementos de terras raras. No entanto, a concentração e proporção de elementos de liga requer otimização. Para desenvolver novas ligas de Mg altamente extrudáveis, são necessários esforços para fornecer uma compreensão e melhoramento dos fatores importantes que caracterizam a extrudabilidade, como os solutos envolvidos, tamanho e distribuição de fases, pois eles podem afetar a fusão localizada, podendo ocasionar em rachaduras durante o processo de extrusão (MENG *et al.*, 2019).

5. PERSPECTIVAS DE LIGAS ALTERNATIVAS DE Mg

5.1 O FUTURO DAS LIGAS DE Mg

Pelo fato de o Mg ser o metal estrutural mais leve e o terceiro material metálico mais comumente usado em automóveis seguindo aço e alumínio, muitos desafios permanecem em vários aspectos de desenvolvimento de ligas e processos de fabricação para explorar sua relação resistência-massa para aplicações leves generalizadas no transporte e outras indústrias.

Para aumentar o uso das ligas de Mg em larga escala, há a necessidade de melhorá-las e adaptá-las para as técnicas de processamento que podem ser utilizadas pela indústria automotiva, para fabricar componentes mais leves, mais ecológicos, mais seguros e, ainda assim, reduzir os custos dos automóveis. O aumento do potencial de aplicação de perfis de magnésio é fortemente dependente da questão envolvendo a aplicabilidade de processos de conformação estabelecidos para alumínio e aço para ligas de magnésio. Aplicações gerais de ligas de magnésio na indústria automotiva estão associadas a produtos fundidos. As ligas forjadas são atualmente usadas para uma extensão limitada, devido à falta de ligas adequadas e algumas restrições tecnológicas impostas pela estrutura cristalina hexagonal do magnésio.

Nos últimos anos, as ligas de Mg de alta resistência concentraram-se principalmente em ligas de terras raras (TR) de Mg e ligas livres de terras raras recém-desenvolvidas, como Mg–Al–Ca, Mg–Sn–Ca, etc. Geralmente a adição de elementos de terras raras às ligas de Mg melhora o desempenho à fluência, aumento de resistência mecânica, melhora de ductilidade, quando comparadas às ligas de Mg sem presença desses elementos (JOOST; KRAJEWSKI, 2017).

Com o avanço da tecnologia, o uso de ligas de Mg tem aumentado nas indústrias, e as combinações mais conhecidas estão na Figura 9.

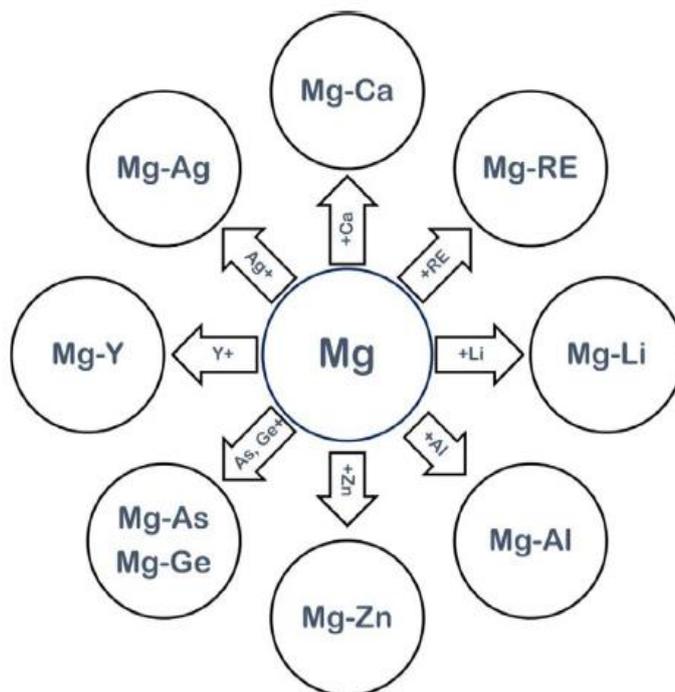


Figura 9 - Ligas de Mg mais empregadas (ESMAILY *et al.*, 2017).

5.1.1 Ligas de Mg contendo Terras Raras

O desenvolvimento de ligas de Mg contendo terras raras têm sido extensivamente estudado por décadas. Até o momento, as pesquisas apontam que as ligas à base de Mg-TR são as ligas de Mg de alta resistência mais promissoras, apesar do rápido desenvolvimento de ligas de Mg sem TR apresentar uma resistência mecânica relativa alta também (PAN *et al.*, 2016).

As ligas de fundição Mg-TR atingem sua alta resistência principalmente através do endurecimento por envelhecimento, que envolve, tratamento de solução sólida a uma temperatura relativamente alta, resfriamento rápido para obter uma solução sólida supersaturada monofásica de α -Mg, e envelhecimento subsequente a um nível relativamente baixo em temperatura para finalmente obter uma fase metaestável ou atingir o equilíbrio capaz de gerar o precipitado na matriz de Mg. O efeito de envelhecimento depende das características da precipitação, ou seja, do tamanho, número, densidade, morfologia, orientação e estrutura dos precipitados. Ambos os fatores internos e externos são fundamentais, ou seja, constituições das ligas e tecnologias de processamento, controle de microestrutura e, por fim, realizar os

ensaios mecânicos para averiguar as propriedades mecânicas dessas ligas de Mg (ZHANG *et al.*, 2018).

A partir de muitas pesquisas, pode-se descobrir que geralmente a resistência das ligas Mg-TR, anteriormente desenvolvidas, é inferior em relação às ligas mais recentes, mesmo que as composições de ligas sejam semelhantes, revelando que o controle dos processos de preparação (processo de fundição, tratamento térmico e processo de deformação) também é muito importante e se torna cada vez mais aprimorado (ZHANG *et al.*, 2018).

Novas ligas foram desenvolvidas e otimizadas visando especificamente a tampa do cabeçote e o cárter de óleo com geometrias complexas. A liga AZ91 foi selecionada como liga base devido à sua boa fundibilidade. A adição de elementos de terras raras incluindo Ce, Y e Nd foi realizada para aumentar a resistência à fluência da liga AZ91 (TONG; LIU; LIU, 2010).

A liga AZ91 não pode atender às demandas de temperaturas além de 120 °C a elevadas tensões. Por outro lado, foi relatado que elementos de terras raras, como Y, La, Nd ou Ce, podem melhorar as propriedades mecânicas em temperatura ambiente e, em temperatura elevada. Portanto, as ligas de magnésio AZ91 com adições de TR foram estudadas a fim de usá-las como peças de automóveis submetidas a 150°C (TONG; LIU; LIU, 2010).

Segundo Guo-Dong para atender às demandas de componentes de alta temperatura em automóveis, a microestrutura e as propriedades mecânicas de várias novas. Os resultados mostram que a adição de Ce tem pouco efeito sobre as propriedades mecânicas da liga AZ91 submetida à alta temperatura, enquanto as adições de Y e Nd desempenham papel importante na melhoria da resistência à fluência. Novas ligas contendo Y(ítrio) ou Nd(Neodímio) podem proporcionar um excelente desempenho em altas temperaturas e foram selecionadas para produzir a tampa do cabeçote de um motor a diesel de alta potência do carro Red Flag e o cárter de óleo do carro Bestturn da montadora chinesa FAW Group. As novas ligas de magnésio com adição de TR para fundição sob pressão têm potencial para produzir peças de trem de força, podendo reduzir muito o peso do componente (TONG; LIU; LIU, 2010).

5.1.2 Ligas Forjadas de Mg contendo Terras Raras

Nas últimas décadas, ligas forjadas de Mg contendo elementos de terras raras tem atraído grandes interesses, principalmente para o aprimoramento da resistência mecânica e formabilidade de ligas de magnésio forjado. Com o avanço das pesquisas descobriu-se que as adições desses elementos podem enfraquecer significativamente a textura e melhorar a deformabilidade das ligas de Mg. Eles também podem fortalecer ligas de Mg efetivamente por meio de mecanismos de fortalecimento por solução sólida e endurecimento por precipitação devido à alta solubilidade dos elementos de liga no Mg. Recentemente, ligas de Mg forjadas contendo elementos TR, como Gd, Y, Nd, Dy, Ho, Er, Ce, La e Yb, foram desenvolvidas. (YOU *et al.*, 2017).

A formação dos compostos intermetálicos de alta temperatura, que podem se formar com Mg, são frequentemente usados para gerar ligas de Mg resistentes à fluência e também podem ser utilizados para endurecimento por precipitação. As ligas de Mg forjadas contendo terras raras oferecem uma gama de sistemas de ligas, como por exemplo ligas de Mg-Zn-TR estabelecidas industrialmente contendo Ce e La ou Mischmetal (Ce/La), as quais são comparativamente mais baratas do que as ligas de Mg-Y-TR (WE43). (ROKHLIN, 2003).

A liga WE43 é considerada uma liga de referência por apresentar uma boa combinação de propriedades mecânicas, corrosão e comportamento de oxidação. Tem sido investigada intensivamente e é usada em várias aplicações. Além disso, é uma candidata de interesse para, por exemplo, a indústria da aviação. Como um teor relativamente alto de Y caro é usado, essa liga tem um preço mais alto do que a maioria das outras ligas de Mg. Por outro lado, ligas Mg-TR usando Ce e La ou Mischmetal (Ce/La) são comparativamente mais baratas. (FUMIN *et al.*, 2012).

5.1.3 Ligas Alternativas de Mg Sem Terras Raras

Ligas de magnésio forjadas de resistência média de baixo custo têm recebido cada vez mais atenção. A resistência mecânica deste tipo de liga é geralmente em torno de 300-400 MPa, e sua principal característica é composta por elementos de liga de baixo custo, que podem conter uma pequena quantidade de elementos de

terras raras ou não . A resistência das ligas de magnésio pode ser melhorada pelo endurecimento por precipitação e pelo endurecimento por refino de grãos , principalmente incluindo Mg–Sn e Mg–Zn. (ZHANG, Y. *et al.*, 2018)

O Mg-Zn forma o constituinte eutético a 340°C que se decompõe em temperaturas abaixo de 325°C em α -Mg e uma fase intermetálica MgZn. É possível endurecer ligas binárias de Mg-Zn por precipitação utilizando zonas GP coerentes, bem como precipitados semi-coerentes. O refinamento de grão em ligas Mg-Zn pode ser alcançado pela adição de Zr, levando a ligas tipo ZK com relativamente boa conformabilidade e resistência mecânica. Exemplos de ligas são a ZW3, que foi usada em rodas de aeronaves forjadas e caixas de câmbio de helicóptero, e a ZK60, que é uma das ligas de forjamento mais conhecida e é aplicada para a produção de rodas em aplicações automotivas. (MOURITZ, 2012)

Enquanto isso, a busca pelo desenvolvimento de uma liga de Mg de alta resistência e, também, de baixo custo motivou pesquisas com ligas à base de Mg-Sn. A adição do Sn é menos custosa e pode ser uma promessa, uma vez que a fase Mg₂Sn formada na liga Mg-Sn tem alto ponto de fusão, sendo possível desenvolver ligas de Mg livre de elementos de terras raras, e ainda assim serem ligas resistentes a altas temperaturas. Além disso, o ponto de fusão superior permite que a liga Mg-Sn seja extrudada em faixas mais amplas de temperaturas e velocidades, porque a falta de calor pode ser prevenida quando comparada com outras ligas Mg–Zn ou Mg–Al (GIBSON *et al.*, 2010).

No entanto, mesmo que ligas Mg-Sn extrudadas resultem em propriedades mecânicas moderadas, a alta quantidade de adição de Sn, ou seja, acima de 8% em peso, limita suas aplicações, já que Sn é caro. Dessa forma há um novo desafio para produzir ligas à base de Mg-Sn com resistências mecânicas moderadas e até mesmo altas, porém reduzindo o teor de Sn. A respeito disso, microadições de outros elementos, como elementos de Ca e/ou Zn em ligas Mg-Sn com baixo teor de Sn torna-se uma alternativa promissora (HUANG *et al.*, 2013).

A utilização do Ca como elemento de liga, formando um sistema alternativo conhecido como, Mg-Sn-Ca, representa a série TX, e pode vir a ser aplicado em produções industriais. O Sn possui um baixo ponto de fusão, enquanto Ca possui uma baixa densidade. Dessa forma, no sistema Mg-Sn-Ca, Sn forma uma solução sólida com Mg oferecendo resistência à corrosão enquanto o Ca forma partículas

intermetálicas termicamente estáveis na matriz para aumentar a resistência à fluência, tendo potencial de aplicação em componentes automotivos como trens de força e berço do motor (YANG; CHENG; PAN, 2010).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da elaboração deste trabalho de conclusão de curso pode-se concluir que há uma necessidade atual e urgente para a redução de gases causadores do efeito estufa, visando economia de combustível, que impacta diretamente no desempenho dos veículos. Desta forma, fica claro o interesse da indústria automobilística pelas ligas de Mg, já que elas têm potencial para atingir esses objetivos. A expansão no emprego das ligas de Mg contribuirá para que as grandes montadoras de automóveis produzam veículos mais leves, mais ecológicos, mais eficientes, mais seguros e mais baratos.

De maneira geral as aplicações de ligas de Mg na indústria automotiva estão resumidas e concentradas em produtos fundidos. Enquanto as ligas forjadas e extrudadas são usadas de maneira limitada, devido à falta de ligas adequadas e algumas restrições tecnológicas fruto da estrutura cristalina do Mg. O fato de as ligas de Mg possuírem emprego limitado indica que o alto custo, a tecnologia de processamento limitada e a compatibilidade com a infraestrutura existente são barreiras maiores do que as propriedades mecânicas.

Portanto, olhando para um cenário a curto prazo, o ideal é que haja uma redução do custo na produção de Mg primário e a implementação de novas tecnologias para obtenção desse elemento, sendo elas de baixo custo e, que sejam relevantes para o setor automotivo. Dessa forma, o Mg e suas ligas poderão proporcionar um maior impacto e, também, aumentar a competitividade dos componentes fundidos de Mg em relação aos produtos fundidos convencionais de Al. O fato de não haver unanimidade em relação ao melhor método de extração de Mg permite que a comunidade científica continue a explorar novas técnicas que sejam comercialmente e tecnicamente viáveis.

Já para um cenário a médio prazo, o desenvolvimento de novas ligas de Mg de baixo custo e que sejam compatíveis com as técnicas de processamento atuais ou sutilmente aprimoradas é crucial. Além disso, deve-se realizar o desenvolvimento de novas vias de processamento de conformação, como forjamento e extrusão, capazes de atender dentro do ciclo de produção das montadoras, ou seja, produzir peças em curtos prazos de tempo e que possam impactar diretamente na redução de custos.

Isso certamente possibilitará a criação de amplas e novas oportunidades para as ligas de Mg dentro da indústria automobilística.

Contudo, ainda há muitos desafios técnicos de fabricação, processamento, desempenho em serviço e comerciais a serem superados para alcançar aplicações das ligas de Mg em larga escala. Portanto, é possível que a longo prazo haja um emprego mais significativo das ligas de Mg na fabricação de componentes estruturais de veículos leves e multimateriais.

Desenvolver ligas de magnésio que suportem maiores temperaturas irá aumentar o uso de Mg na fabricação de componentes que ficam expostos a elevadas temperaturas e é uma necessidade. Para isso há uma concentração de esforços no desenvolvimento de ligas de Mg contendo terras raras, as quais estão mais próximas para atender a esse requisito exigido pela indústria automobilística e, também podem resultar em propriedades mecânicas superiores, possibilitando uma aplicação mais ampla. Enquanto isso, paralelamente, há o desenvolvimento de ligas de Mg sem a presença de elementos de terras raras, como ligas dos sistemas Mg-Zn e Mg-Sn, que a princípio apresentam propriedades mecânicas intermediárias, e melhores características para serem utilizadas em processos de conformação.

Embora a reciclagem de produtos de Mg não tenha sido abordada neste trabalho, algumas palavras devem ser ditas, pois ela desempenha um papel importante na estrutura geral do mercado de Mg. As matérias-primas para a produção primária de magnésio estão disponíveis em abundância ilimitada, mas sua extração é muito intensiva em energia. A reciclagem de ligas já existentes é muito mais eficiente em termos energéticos e, portanto, de interesse industrial. Uma visão geral sobre o tema da reciclagem de magnésio pode ser encontrada no trabalho de Ditzel e Scharf. (2008)

Sendo assim, há uma oportunidade substancial para inovação em ligas, processamento, e aplicações de ligas de Mg capazes de incentivar novas ideias, novos participantes e novos investimentos relacionados ao universo de pesquisa do Mg. A leveza do Mg sustenta e motiva as comunidades científica, tecnológica e comercial na busca contínua por maneiras de reduzir o peso, aprimorar o desempenho e alcançar um futuro melhor para componentes automotivos produzidos a partir de ligas de Mg.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROOKS, G. *et al.* The carbothermic route to magnesium. **JOM**, [s. l.], v. 58, n. 5, p. 51–55, mai. 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-006-0024-x>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- CALADO, L. M.; CARMEZIM, M. J.; MONTEMOR, M. F. Rare Earth Based Magnesium Alloys—A Review on WE Series. **Frontiers in Materials**, [s. l.], v. 8, p. 1-18, jan. 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2021.804906/full>. Acesso em: 7 abr. 2022.
- CZERWINSKI, F. Current Trends in Automotive Lightweighting Strategies and Materials. **Materials**, [s. l.], v. 14, , n. 6631, p.1-27, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/21/6631>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- CZERWINSKI, F. **Magnesium Injection Molding**. Boston, MA: Springer US, 2008. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-72528-4>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- DAS, S. Magnesium for automotive applications: Primary production cost assessment. **JOM**, [s. l.], v. 55, n. 11, p. 22–26, nov. 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/227082665_Magnesium_for_Automotive_Applications_Primary_Production_Cost_Assessment. Acesso em: 6 abr. 2022.
- DAVIES, G. **Materials for Automobile Bodies**. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2012. *E-book*. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/materials-for-automobile-bodies/davies/978-0-7506-5692-4>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- DIERINGA, H.; KAINER, K. U. Magnesium – der Zukunftswerkstoff für die Automobilindustrie?. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 91–96, fev. 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mawe.200600114>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- DITZE, A.; SCHARF, C. Recycling of Magnesium Alloys. *In*: KAINER, K.U. **MAGNESIUM– ALLOYS AND TECHNOLOGY**. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. p. 254–278. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/3527602046.ch16>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- DZIUBIŃSKA, A. *et al.* The Forming Of Magnesium Alloy Forgings For Aircraft And Automotive Applications. **Advances in Science and Technology Research Journal**, [s. l.], v. 10, n. 31, p. 158–168, 2016. Disponível em: <http://www.astrj.com/The-forming-of-magnesium-alloy-forgings-for-aircraft-and-automotive-applications,64003,0,2.html>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- ELIEZER, D.; AGHION, E.; FROES, F. H. (Sam). *Magnesium Science, Technology*

and Application. **Advanced Performance Materials**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 201–212, 1998. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008682415141>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ESMAILY, M. *et al.* Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 89, n. 98, p. 92–193, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517300506>. Acesso em: 6 abr. 2022.

FRIEDRICH, H. E.; MORDIKE, B. L. **Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2006. p. 30–34 *E-book*. Disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/0102/68/L-G-0000010268-0002343720.pdf>. Acesso em: 6 Mar. 2022.

FRIEDRICH, H.; SCHUMANN, S. Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 117, n. 3, p. 276–281, nov. 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222861902_Research_for_a_new_age_of_magnesium_in_the_automotive_industry. Acesso em: 6 abr. 2022.

FUMIN, L.. *et al.* Review on long-period stacking-ordered structures in Mg-Zn-RE alloys. **Rare Metals**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 303–310, jun. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257790490_Review_on_long-period_stacking-ordered_structures_in_Mg-Zn-RE_alloys. Acesso em: 6 abr. 2022.

GARSDIE, M. **Primary magnesium production worldwide 2021**. [S. l.], mar. 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/569515/primary-magnesium-production-worldwide/>. Acesso em: 6 abr. 2022.

GIBSON, M. A. *et al.* The effect of precipitate state on the creep resistance of Mg–Sn alloys. **Scripta Materialia**, [s. l.], v. 63, n. 8, p. 899–902, 2010. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-3e50c366-043b-3371-b013-04664737b775>. Acesso em: 6 abr. 2022.

REPORT BUYER. Global Magnesium Industry. [S. l.], abr.2022. Disponível em: <https://www.reportbuyer.com/product/5799036/global-magnesium-industry.htm>. Acesso em: 6 abr. 2022.

GUPTA, M.; SHARON, N. M. L. **Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites**. [S. l.]: Wiley, 2010. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470905098>. Acesso em: 6 abr. 2022.

HUANG, Y. *et al.* Effects of Sn segregation and precipitates on creep response of Mg-Sn alloys. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 308–315, abr. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259752584_Effects_of_Sn_segregation_and_precipitates_on_creep_response_of_Mg-Sn_alloys. Acesso em: 6 abr. 2022.

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

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359646216303621>. Acesso em: 6 abr. 2022.

KAINER, K. U. *et al.* Development of the Microstructure and Texture of RE Containing Magnesium Alloys during Hot Rolling. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 654–656, p. 580–585, jun. 2010. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.654-656.580>. Acesso em: 7 abr. 2022.

KAINER, K. U. **Magnesium Alloys and Technologies**. [S. l.]:Wiley-VCH, mar. 2006. *E-book*. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Magnesium+Alloys+and+Technologies-p-9783527605965>. Acesso em: 6 abr. 2022.

KAINER, K. U.; BENZLER, T. U. Squeeze-Casting and Thixo-Casting of Magnesium Alloys. *In*: KAINER, K.U. **Magnesium–Alloys and Technology**. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003, p. 56–71. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/3527602046.ch4>. Acesso em: 9 abr. 2022.

KRAMER, D. A. Magnesium, its alloys and compounds. **U.S. Geological Survey Open-File Report**, [s. l.], v. 01, n. 341, 2001. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-341/of01-341.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2022.

KULEKCI, M. K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 39, p. 851–865, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-007-1279-2>. Acesso em: 6 abr. 2022.

KURIHARA, Y. The role of aluminum in automotive weight reduction—Part II. **JOM**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 33–35, fev.1994. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03222554>. Acesso em: 6 abr. 2022.

LEBEAU, S. E. *et al.* Evaluation of Thixomolded, Magnesium Alloy Components for Structural Automotive Applications. *In*: SAE 2004 World Congress & Exhibition. **SAE Technical Paper Series**. 2004-01-0137, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4271/2004-01-0137>. Acesso em: 6 abr. 2022.

LUO, A. A. Magnesium casting technology for structural applications. **Journal of Magnesium and Alloys**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 2–22, mar. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956713000030>. Acesso em: 6 abr. 2022.

LUO, A.A.; SACHDEV, A. K. Applications of magnesium alloys in automotive engineering. *In*: BETTLES, C.; BARNETT, M. **Advances In Wrought Magnesium Alloys**. [S. l.]: Elsevier, 2012. p. 393–426. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857093844.3.393>. Acesso em: 6 abr. 2022.

MARUYAMA, K.; SUZUKI, M.; SATO, H. Creep strength of magnesium-based alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 875–882, jan. 2002. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/225259136_Creep_strength_of_magnesium-based_alloys. Acesso em: 6 abr. 2022.

MENG, S.-J. *et al.* Recent Progress and Development in Extrusion of Rare Earth Free Mg Alloys: A Review. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 145–168, jan. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330451019_Recent_Progress_and_Development_in_Extrusion_of_Rare_Earth_Free_Mg_Alloys_A_Review. Acesso em: 6 abr. 2022.

MICHALEK, J. J.; PAPALAMBROS, P. Y.; SKERLOS, S. J. A Study of Fuel Efficiency and Emission Policy Impact on Optimal Vehicle Design Decisions. **Journal of Mechanical Design**, [s. l.], v. 126, n. 6, p. 1062–1070, nov. 2004. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article-abstract/126/6/1062/460098/A-Study-of-Fuel-Efficiency-and-Emission-Policy>. Acesso em: 6 abr. 2022.

MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2022. [S. l.]: US Geological Survey, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3133/mcs2022>. Acesso em: 23 Abr. 2022.

MORDIKE, B. L.; EBERT, T. Magnesium: properties, applications, potential. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 302, n. 1, p. 37–45, abr. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509300013514>. Acesso em: 6 abr. 2022.

MOURITZ, A. **Introduction to Aerospace Materials**. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., jul. 2012. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2514/4.869198>. Acesso em: 6 abr. 2022.

NIU, L. Y. *et al.* A study and application of zinc phosphate coating on AZ91D magnesium alloy. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 200, n. 9, p. 3021–3026, fev. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897204011338#!>. Acesso em: 6 abr. 2022.

OUYANG, L. *et al.* Magnesium-based hydrogen storage compounds: A review. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 832, p. 154865, 2020. Disponível em: Acesso em: 23 Abr. 2022.

PAN, H. *et al.* Recent developments in rare-earth free wrought magnesium alloys having high strength: A review. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 663, n. 11, p. 321–331, abr. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/290201320_Recent_developments_in_rare-earth_free_wrought_magnesium_alloys_having_high_strength_A_review. Acesso em: 6 abr. 2022.

PAN, F.; YANG, M.; CHEN, X. A Review on Casting Magnesium Alloys: Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys. **Journal of Materials Science & Technology**, [s. l.], v. 32, n. 12, p. 1211–1221, dez. 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030216301013>. Acesso em: 6 Abr. 2022.

PAPENBERG, N. P. *et al.* Mg-Alloys for Forging Applications—A Review. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 985, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/4/985>. Acesso em: 6 abr. 2022.

PETER, I.; ROSSO, M. Light Alloys - From Traditional to Innovative Technologies. *In*: AHMAD, Z. **New Trends in Alloy Development, Characterization and Application**. [S. l.]: Intech Open, set. 2015. *E-book*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311980248_Light_Alloys_-_From_Traditional_to_Innovative_Technologies. Acesso em: 7 abr. 2022.

POLMEAR, I. *et al.* Magnesium Alloys. *In*: POLMEAR, I. *et al.* **Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals**. [S. l.]: Elsevier, 5 ed., 2017. p. 287–367. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-099431-4.00006-3>. Acesso em: 6 abr. 2022.

POWELL, B. R.; KRAJEWSKI, P. E.; LUO, A. A. Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive structures. *In*: MALLICK, P.K. **Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles**. [S. l.]: Elsevier, 2 ed., 2021. p. 125–186. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-818712-8.00004-5>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ASM HANDBOOK. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. [S. l.]: ASM International, v. 2, 1990. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31399/asm.hb.v02.9781627081627>. Acesso em: 6 abr. 2022.

RAMAKRISHNAN, S.; KOLTUN, P. Global warming impact of the magnesium produced in China using the Pidgeon process. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 49–64, ago. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223602883_Global_Warming_Impact_of_the_Magnesium_Produced_in_China_Using_the_Pidgeon_Process. Acesso em: 6 abr. 2022.

RIMA. **Magnésio – Rima Industrial**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.rima.com.br/magnesio/>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ROKHLIN, L. L. **Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals**. [S. l.]: CRC Press, 2003. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1201/9781482265163>. Acesso em: 6 abr. 2022.

SADAYAPPAN, M.. *et al.* Characterization of Magnesium Automotive Components Produced by Super-Vacuum Die Casting Process. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 618–619, p. 381–386, jan. 2009. Disponível em: <https://experts.mcmaster.ca/display/publication1663046>. Acesso em: 7 abr. 2022.

SEETHARAMAN, S.; GUPTA, M. Emergence of god's favorite metallic element: Magnesium based materials for engineering and biomedical applications. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 39, n. 12, p. 311–316, ago. 2020. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/343972224_Emergence_of_god's_favorite_metallic_element_Magnesium_based_materials_for_engineering_and_biomedical_applications. Acesso em: 6 abr. 2022.

SCHUMANN, S. The Paths and Strategies for Increased Magnesium Applications in Vehicles. **Materials Science Forum**, [s.l.], v. 488-489, p. 1-8, jul. 2005.. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4028/0-87849-968-7.1>. Acesso em: 6 abr. 2022.

SHI, Z.; SONG, G.; ATRENS, A. Influence of anodising current on the corrosion resistance of anodised AZ91D magnesium alloy. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 48, n. 8, p. 1939–1959, ago. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222248205_Influence_of_anodising_current_on_the_corrosion_resistance_of_anodised_AZ91D_magnesium_alloy. Acesso em: 6 abr. 2022.

STJOHN, D. H. *et al.* Grain refinement of magnesium alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, [s. l.], v. 36, n. 7, p. 1669–1679, jul. 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-005-0030-6>. Acesso em: 6 abr. 2022.

TAYLOR, G. W. A Review of Automotive Emission Control Programs Around the World. *In*: 1978 SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition. . **SAE Technical Paper Series**. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 1978, 780950. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4271/780950>. Acesso em: 6 abr. 2022.

TONG, G.; LIU, H.; LIU, Y. Effect of rare earth additions on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, [s. l.], v. 20, n. 21, p. s336–s340, jul. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1003632610604931>. Acesso em: 6 abr. 2022.

VINARCIK, E. J. **High Integrity Die Casting Processes**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2003. *E-book*. Disponível em: <http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/pendidikan/aan-ardian-mpd/1f-handbook-die-casting-proceses-edwadrd-j-virnacik-2003.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2022.

WADSLEY, M. W. Magnesium Metal by the Heggie - Iolaire Process. *In*: KAPLAN, H.I.; HRYN, J.; CLOW, B. Magnesium Technology 2000. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. p. 65–70. *E-book*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118808962.ch11>. Acesso em: 6 abr. 2022.

WANG, J. *et al.* Biodegradable Magnesium-Based Implants in Orthopedics—A General Review and Perspectives. **Advanced Science**, [s. l.], v. 7, n. 8, p. 1-19, abr. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.201902443>. Acesso em: 6 abr. 2022.

WU, H. *et al.* Magnesium production by a coupled electric and thermal field. **Vacuum**, [s. l.], v. 183, n. 3, p. 109822, out. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346051293_Magnesium_production_by_a

coupled_electric_and_thermal_field. Acesso em: 6 abr. 2022.

WU, L.; HAN, F.; LIU, G. **Comprehensive Utilization of Magnesium Slag by Pidgeon Process**. [S. l.]: Springer, 2021. *E-book*. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-16-2171-0>. Acesso em: 6 abr. 2022.

YANG, M. *et al.* Comparison of as-cast microstructure, tensile and creep properties for Mg-3Sn-1Ca and Mg-3Sn-2Ca magnesium alloys. **International Journal of Cast Metals Research**. [s.l.], v. 24, n. 6, p. 351-356, nov. 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1743133611Y.0000000006?journalCode=ycomr20>. Acesso em: 6 abr. 2022.

YOU, S. *et al.* Recent research and developments on wrought magnesium alloys. **Journal of Magnesium and Alloys**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 239–253, set. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956717300464>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ZENG, Z. *et al.* Magnesium extrusion alloys: a review of developments and prospects. **International Materials Reviews**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 27–62, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09506608.2017.1421439>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ZHANG, J. *et al.* Recent developments in high-strength Mg-RE-based alloys: Focusing on Mg-Gd and Mg-Y systems. **Journal of Magnesium and Alloys**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 277–291, set. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956718300501>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ZHANG, Y. *et al.* Microstructure and mechanical properties of as-extruded Mg-Sn-Zn-Ca alloy with different extrusion ratios. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, [s. l.], v. 28, n. 11, p. 2190–2198, nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1003632618648642>. Acesso em: 6 abr. 2022.