

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

**AVALIAÇÃO DAS LIGAS DA SÉRIE 6000 PARA  
APLICAÇÃO EM CHASSI DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

**FELIPE ESCHER SALDANHA**

**SÃO CARLOS – SP  
2022**

# **AVALIAÇÃO DAS LIGAS DA SÉRIE 6000 PARA APLICAÇÃO EM CHASSI DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

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:** Felipe Escher Saldanha

**RA:** 745923

**TÍTULO:** Simulação termodinâmica e de propriedades de ligas da série 6000 para aplicação em chassi de veículos elétricos

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

**CO-ORIENTADOR(A):** Eng. Sarah Maria de Albuquerque Sousa

**DATA/HORÁRIO:** 22/04/2022, 10h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. José Eduardo Spinelli	10,0	10,0
Prof. Dr. Francisco Gil Coury	10,0	10,0
<b>Média</b>	10,0	10,0

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. Francisco Gil Coury 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

## **Agradecimentos**

Aos meus pais pela confiança, pelo suporte e pela paciência em todos os momentos de minha vida.

A minha companheira Jeysa Iara de Souza pela constante motivação nos momentos de luta e sacrifício.

Ao professor José Eduardo Spinelli pelo incentivo, confiança e liberdade com que conduziu a orientação desse trabalho e de outros.

A Sarah Maria Albuquerque de Sousa e Guilherme Lisboa Gouveia pela ajuda e assistência em momentos importantes.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar por proporcionar uma excelente formação.

Aos amigos e familiares que em algum momento ofereceram suporte e motivação em minha trajetória.

## RESUMO

O surgimento e crescimento de novos conceitos sociais leva às indústrias uma série de mudanças para adequação desses conceitos, com novos perfis de usuários, exigência de segurança e consciência ambiental. A indústria automobilística não está fora disso, o uso do combustível fóssil é cada vez mais visto como uma ameaça ao meio ambiente por se tratar de uma fonte de energia não-renovável e, também, devido a emissão de poluentes através da queima desses combustíveis. Com isso, o mercado de veículos elétricos está cada vez maior, visto como a melhor alternativa para substituição dos veículos movidos a combustão interna. Desenvolvimentos recentes acerca dos veículos elétricos permitiram que os mesmos atingissem um nível de performance, conforto e segurança que os permite competir com os veículos tradicionais. A maior dificuldade de fabricantes de veículos elétricos está relacionada à autonomia e à eficiência energética. Por isso, diversos estudos estão direcionados a fim de melhorar a autonomia, visando um aumento na eficiência dos motores e componentes elétricos e redução de peso de componentes estruturais. Ligas de alumínio são cada vez mais escolhidas para produção de elementos estruturais, pela sua baixa densidade e boas propriedades mecânicas e de corrosão. As ligas da série 6000 são frequentemente usadas nos chassis e carrocerias. Diante disso, nesse trabalho é proposto a comparação de ligas da série 6000, nas condições de tratamento térmico T4 e T6, por meio de simulações termodinâmicas (uso do software Thermo-Calc®), de propriedades e outras características (uso do software Granta/Edupack) com o objetivo de selecionar as melhores ligas. Foram consideradas as propriedades mecânicas, a facilidade de processamento e o impacto ambiental. Nessa comparação foi observado que, em geral, as ligas na condição de tratamento térmico T6 apresentam melhores resultados em termos de propriedades mecânicas, mas, em contrapartida, impactam mais o meio ambiente na sua produção. Com isso, a liga 6010-T6 foi classificada como a melhor em termos de desempenho, a liga 6061-T4 a melhor no que se refere à processabilidade e a liga 6009-T4 a que apresentou menor impacto ambiental. Com uma visão mais geral, a liga 6111-T4 foi destacada como a liga que teve o melhor balanço considerando todos os parâmetros analisados.

**Palavras-chave:** Veículos Elétricos; Ligas da Série 6000; Indústria 4.0; Impacto ambiental.

## ABSTRACT

The emergence and growth of new social concepts leads the industries to make a series of changes to adapt with new user profiles, safety requirements, and environmental awareness. The use of fossil fuels is increasingly seen as a threat to the environment because it is a non-renewable energy source and because of the emission of pollutants through the burning of these fuels. With this, the market for electric vehicles is growing, seen as the best alternative to replace internal combustion-powered vehicles. Recent developments in electric vehicles have allowed them to reach a level of performance, comfort, and safety that enables them to compete with traditional vehicles. The biggest difficulty for electric vehicle manufacturers is related to autonomy and energy efficiency. Therefore, several studies are directed towards increasing the autonomy of these vehicles, aiming at an increase in the efficiency of the electric motors and components, and weight reduction of structural components. Aluminum alloys are increasingly being chosen to produce structural elements, due to their low density and good mechanical and corrosion properties. The 6000 series alloys are often used in chassis and bodywork. In view of this, this work proposes a comparison of 6000 series alloys, under T4 and T6 heat treatment conditions, by means of thermodynamic (using Thermo-Calc<sup>®</sup> software) and property simulations (using Granta/Edupack) in order to select the best alloys considering application properties, processability, and environmental impact. In this comparison it was observed that, in general, the T6-heat treated alloys present better results in terms of mechanical properties, but, on the other hand, they have more impact on the environment. As such, the 6010-T6 alloy was classified as the best in terms of performance, the 6061-T4 alloy the best in terms of processability, and the 6009-T4 alloy presented the lowest environmental impact. Taking a more general view, the 6111-T4 alloy was highlighted as the alloy showing the best performance/processability/ environmental impact balance.

**Keywords:** Electric Vehicle; 6000 Series Alloys; Industry 4.0; Environmental Impact.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	2
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	3
2.1. INDÚSTRIA 4.0 E VEÍCULOS ELÉTRICOS .....	3
2.1.1. <b>Simulação</b> .....	3
2.1.2. <b>Veículos Elétricos</b> .....	8
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS CHASSIS FABRICADOS COM EMPREGO DE LIGAS DE AL. .9	
2.2.1. <b>Busca da Redução de Peso</b> .....	9
2.2.2. <b>Tipos de Chassis</b> .....	11
2.2.3. <b>Características Importantes para um Chassi Leve</b> .....	14
2.3. LIGAS CANDIDATAS E SUAS CARACTERÍSTICAS .....	16
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	19
<b>4. RESULTADOS</b> .....	21
4.1. PROPRIEDADES DE APLICAÇÃO .....	23
4.2. PROCESSABILIDADE .....	32
4.3. IMPACTO AMBIENTAL .....	36
<b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	41
5.1. CENÁRIO DE MELHOR DESEMPENHO .....	43
5.2. CENÁRIO DE MELHOR PROCESSABILIDADE .....	44
5.3. CENÁRIO DE MENOR IMPACTO AMBIENTAL .....	46
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	48
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	49

## 1. INTRODUÇÃO

As novas tendências de desenvolvimento tecnológico e industrial estão cada vez mais presentes no processo de fabricação de novos produtos. E esses novos produtos estão sendo moldados em torno de novos conceitos sociais, os quais envolvem novos perfis de usuários, maior exigência de segurança, consciência ambiental, etc. Um exemplo disso pode ser observado na indústria automobilística, onde a procura por veículos elétricos tem crescido nos últimos anos devido a necessidade de substituição de combustíveis fósseis, tendo em vista os fatores ambientais. [1-3]

Dessa forma, estudos estão sendo conduzidos com o objetivo de melhorar a autonomia destes veículos e torná-los competitivos com os veículos movidos a combustão interna. Dentro disso, a eficiência dos motores elétricos, bateria, transmissão, peso de cada componente e até perfis inteligentes de controle de aceleração estão sendo desenvolvidos para obter o melhor balanço entre autonomia e desempenho. [3-5]

Nesse contexto, as ligas de alumínio têm tido grande aplicação e bons resultados em função da sua baixa densidade e boas propriedades [6]. A maior fração desses materiais, especialmente ligas da série 3xx, está sendo aplicada na fabricação de blocos de motor através da fundição. As ligas forjadas, por sua vez, têm grande aplicação estrutural em chassis e carroceria dos carros. Com a aplicação de ligas de Al, a redução de peso dessas estruturas chega em até 50% em relação às estruturas produzidas com aços. [7]

As ligas forjadas têm sido aplicadas, principalmente, em peças extrudadas, sendo ainda soldadas a outras peças para formação da carroceria final dos veículos elétricos. As principais ligas que estão sendo utilizadas para essa aplicação são as ligas da série 6000, devido às adequadas propriedades e características de resistência mecânica, resistência à corrosão, conformabilidade e soldabilidade. Além disso, são endurecidas via tratamento térmico e possuem boa relação custo-benefício, na relação comparativa com as ligas das series 5000 e 7000, por exemplo. [6-8]

## 1.1. OBJETIVOS

Na maioria dos textos analisados sobre aplicação de ligas de alumínio em chassis de veículos, como o estudo de MILLER et al. [7], as ligas da série 6000 são as que tiveram maior aplicação. Porém, apesar de serem ligas constituídas dos mesmos elementos químicos, ainda existe uma variação de composição e propriedades. Por consequência disso, este trabalho tem como objetivo a análise dessas ligas em termos termodinâmicos e de propriedades, produzindo uma comparação e classificação dessas ligas, utilizando os softwares *Thermo-Calc*<sup>®</sup> e *GRANTA Edupack*. Então, o desafio deste trabalho está na correlação dos resultados obtidos pelos softwares e seleção do material de maior potencial de aplicação em chassis de veículos elétricos em termos de desempenho, processabilidade, impacto ambiental e custo.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. INDUSTRIA 4.0 E VEÍCULOS ELÉTRICOS**

A indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, tem como diretriz a automação industrial e implementação de diversas tecnologias visando melhorar a produtividade, a eficiência energética e do trabalho e a qualidade dos produtos e serviços. A implementação dessas tecnologias permite uma troca de informações de forma rápida e automatizada, aumentando a produtividade e facilitando o monitoramento e manutenção de equipamentos e processos. [1]

Apesar da indústria automotiva parecer cada vez mais consolidada, a evolução da tecnologia e o surgimento de novos conceitos sociais em relação aos veículos geram desafios, que podem ser resolvidos através da indústria 4.0 e suas principais tecnologias; inteligência artificial, computação em nuvem, internet das coisas, robótica avançada, integração de sistemas e sistemas de simulação.

Esses desafios englobam novos perfis de usuários, maior exigência de segurança, consciência ambiental etc. Tudo isso faz com que alternativas sustentáveis, como motores elétricos, sejam cada vez mais procuradas. [2]

Para abastecer essa tendência de veículos elétricos, essa indústria ainda lida com limitações de autonomia, tempo de recarga de baterias e potência limitada. O potencial dessa tecnologia é enorme, mas ainda necessita de ajustes para que supere o uso de motores de combustão interna. [3]

#### **2.1.1. Simulação**

Simulação é um teste ou uma imitação aproximada da realidade. Pode ser utilizada em vários contextos diferentes e de várias formas diferentes, mas com intenção de ajustar, otimizar ou entender o funcionamento de sistemas naturais,

humanos, mecânicos etc. A simulação também é usada quando a situação real não pode ser produzida por ser fisicamente ou economicamente arriscada [9].

A ideia de simulação tem origem nos antigos jogos de tabuleiros que tentavam representar os campos de batalha. Um desses jogos é amplamente conhecido até hoje, o xadrez. O tabuleiro e as peças representam um campo de guerra e os jogadores simulam uma batalha com diferentes estratégias e movimentos. O xadrez teve papel importante na antiguidade, treinando comandantes dos exércitos antigos a planejarem e executarem boas estratégias de batalha [10].

A simulação computacional, a qual é o enfoque desse trabalho de TCC, teve impulso a partir da Segunda Guerra Mundial. O exército americano utilizava computadores de ponta para cálculos balísticos buscando simular o lançamento de mísseis. É possível observar que a história militar tem grande influência no surgimento e no desenvolvimento da simulação. [10]

Já na década de 1970, a indústria automotiva implementou o uso da simulação em sua linha de montagem para resolução de problemas de segurança e otimizar a produção. Mais tarde, na década de 1990, o avanço da tecnologia e do poder computacional e o barateamento dos equipamentos difundiram ainda mais o uso da simulação como meio mais produtivo na elaboração de projetos, animações, pesquisas, entre outras mais aplicações possíveis. [10]

O tempo e a evolução tecnológica permitiram consolidar a implementação dessas ferramentas. Hoje em dia, veículos são projetados virtualmente e testados, a fim de obter dados de durabilidade, fadiga, segurança de impacto, entre outros testes. Com isso, a necessidade de protótipos físicos reduziu, e os protótipos já saem com dados previamente calculados computacionalmente, abandonando a filosofia do ciclo da tentativa e erro. Com isso, o processo completo de produção de veículos tem sido drasticamente reduzido, tanto em tempo quanto em custo. [11]

Além dessa aplicação direta da simulação nos testes de segurança dos projetos de novos carros, a simulação também é de grande importância na aferição da melhor rota de produção. É uma forma de analisar a quantidade de equipamento que será necessário, o tempo de ciclo, a programação da produção e o estoque necessário para o projeto. Nesse sentido, é possível aumentar a produtividade da linha, reduzir custos e evitar problemas técnicos e ambientais. [11]

Dessa forma, o emprego da simulação computacional na indústria automotiva traz uma série de vantagens visando a obtenção de produtos otimizados e maior assertividade inicial nas escolhas dos materiais, processamento, requisitos de segurança e planejamento.

Todas as áreas da engenharia têm desenvolvido métodos de ensaios ou testes experimentais através da simulação, assim reduzindo o consumo dos insumos, como custo de produção, tempo e recursos. Diante disso, a simulação se torna cada vez mais um recurso inestimável no avanço tecnológico e intelectual por permitir a previsão e observação de fenômenos e situações com precisão e acurácia. [12]

Cada situação exige uma modelagem computacional própria, a fim de simular um comportamento da forma mais real possível. Assim sendo, essa modelagem exige que uma série de passos sejam bem determinados. O primeiro é a simplificação e extração das propriedades físicas que regem tal fenômeno. O segundo é o modelo matemático, que são equações geradas com intuito de descrever o comportamento de algo. O terceiro é a discretização do domínio do problema, referente a forma com que o problema será dividido (malha, nós ou partículas). O quarto se trata do algoritmo numérico, que tem como função ajustar o segundo passo, referente ao modelo matemático, determinando condições iniciais e de contornos e soluções das equações algébricas. O quinto passo é a implementação do código, onde são descritas as condições em que o computador deve operar, inclusive a confiabilidade dos resultados. O sexto e último passo é a simulação em si, onde é feita a obtenção, validação, renderização e interpretação dos resultados obtidos através da simulação. [12]

Nos dias de hoje a simulação já é parte fundamental e já participa de várias informações obtidas em nosso cotidiano em áreas como astronomia, previsões climáticas, em reações químicas, estudo de sistemas elétricos e comportamento de gases. [12]

Outros exemplos práticos da aplicação da simulação na engenharia são os softwares *MAGMASOFT*, o *Thermo-Calc*<sup>®</sup> e o *GRANTA Edupack*. O *MAGMASOFT* é um programa para simulação de processos de fundição de peças. Ele busca otimizar a qualidade do fundido reduzindo o custo de produção. O software prevê de forma detalhada e com exatidão o processo de fundição do projeto de uma peça, podendo

identificar falhas de projeto e possíveis defeitos e suas localizações. A Figura 1a é um exemplo de visualização do software, onde é possível fazer uma análise da distribuição de temperatura no preenchimento de um molde. Já na Figura 1b e na Figura 1c é representado as peças após preenchimento do molde com previsão de alimentação e porosidade na peça final. [13-15]

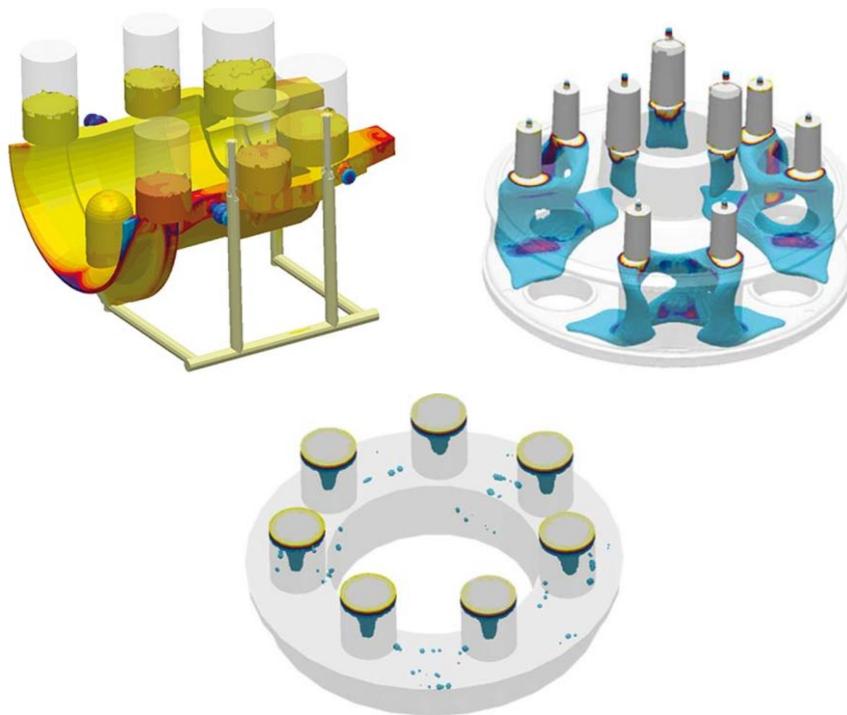


Figura 1: Exemplos de aplicações de simulações via *MAGMASOFT*, sendo (a) a distribuição de temperatura no preenchimento, (b) visualização de regiões no fundido e (c) previsão de alimentação e porosidade. [13]

O *Thermo-Calc*<sup>®</sup> também é um software de simulação computacional que trabalha com um conjunto de bases de dados, permitindo o usuário calcular e prever o comportamento de materiais ao longo de seu ciclo de vida. O software trabalha com cálculos do equilíbrio termodinâmico, podendo assim construir diagramas de fases, entre outras propriedades, como no exemplo de diagrama da Figura 2. Permitindo, assim, que o usuário consiga melhorar condições de processamento e de solidificação de diversos materiais. [14]

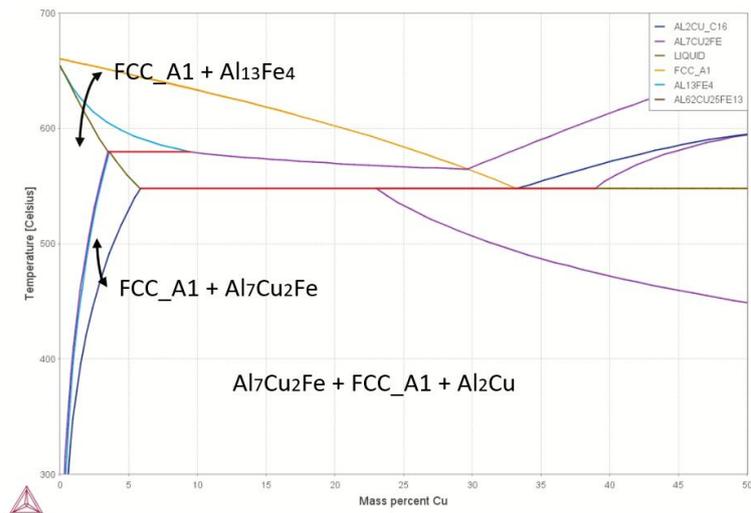


Figura 2: Exemplo de simulações pelo software *Thermo-Calc*<sup>®</sup>: isopleta do sistema ternário Al-Cu-Fe.

O GRANTA Edupack é um software muito utilizado por universidades no aprendizado de engenharia de materiais e processos. O software tem uma enorme base de dados que proporciona um grande auxílio a professores, alunos e profissionais da área por meio da exploração, investigação e seleção de materiais e processos. O software contém em sua base dados de mais de 4000 materiais e 246 processos diferentes. Com isso, o usuário consegue informações importantes para seleção de materiais em determinada aplicação, levando em conta as mais diversas propriedades dos materiais, custo, gasto energético e emissão de poluentes na produção, como demonstrado pelo fluxograma da Figura 3 disponibilizado pelo software. [15]

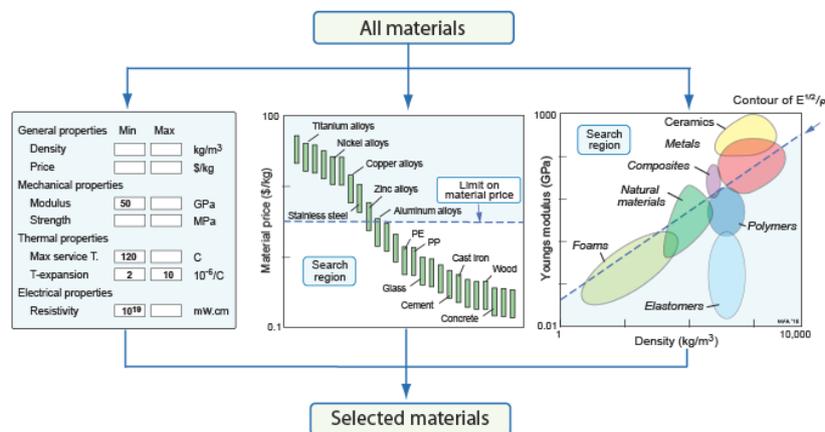


Figura 3: Exemplo de uso do software *GRANTA* para seleção de materiais através de sua base de dados. [10]

Os diversos softwares de simulação podem ser usados de forma conjunta, trazendo diferentes informações e interpretações para uma mesma situação e, assim, se complementando. Um exemplo disso será visto no presente trabalho, onde serão geradas simulações termodinâmicas pelo software *Thermo-Calc*<sup>®</sup>, analisando as fases e possíveis composições e microestruturas dos materiais e, também serão conduzidas simulações pelo software *GRANTA*, buscando comparação de propriedades de interesse, preços, custos energéticos e outros fatores ambientais. [14-15]

### **2.1.2. Veículos Elétricos**

O aumento na consciência ambiental social, devido a poluição e mudanças climáticas, estimula o desenvolvimento e a procura por soluções menos poluentes no setor automobilístico, devido esse segmento ser responsável por cerca de 25% na emissão global de gases do efeito estufa. Todos os anos, países da União Europeia, os Estados Unidos, o Japão, entre outros, estabelecem metas mais rígidas acerca das emissões de CO<sub>2</sub> para automóveis de passageiros e veículos comerciais. Esse fato, aliado ao aumento do preço dos combustíveis e a consciência ambiental já citada, levanta o interesse por veículos elétricos e híbridos. [4-5]

Ainda assim, a autonomia dos veículos elétricos é o principal fator limitante para o uso em massa dos mesmos. Para que isso seja contornado, os pontos chave a serem explorados são o consumo de energia e o desempenho do veículo. Por isso, existem diversos estudos em busca de melhores motores, transmissões, baterias e até perfis de aceleração e administração de energia por inteligência artificial nestes veículos, que estão cada vez mais tecnológicos. [5]

A eficiência dos motores elétricos pode chegar a 80%, contra 20% dos motores a combustão interna. A bateria acaba sendo o componente responsável pelo maior custo entre os componentes desses veículos. Porém, nos últimos anos o custo das baterias reduziu 89%, aproximando o preço aos veículos a combustão em alguns países [4].

Outro fator a ser discutido é a presença, ou não, de incentivos políticos que os países podem adotar a favor do uso de energias renováveis e menor dependência dos combustíveis. Em países como o Brasil o preço dos veículos elétricos está fora dos padrões dos consumidores. Isso devido a gastos relativos a logística e importação desses veículos. Além disso, uma desvantagem que pode ser facilmente percebida pelos consumidores é a intermitência de postos de recarga de baterias, que, junto ao problema de autonomia, pode gerar insegurança e desconforto aos consumidores. [4]

A Noruega é o país de maior sucesso no setor de veículos elétricos, que já representa 54% das vendas anuais de automóveis; e planeja interromper a venda de veículos a combustão em 2025. A forma com que o país atingiu esses números foi por meio de um sistema político de taxação baseado no princípio poluidor pagador, fazendo com que os veículos elétricos ficassem mais atraentes. [4]

Também existem inúmeros exemplos de veículos elétricos utilizados de maneira eficiente. Caminhões de entrega, cujos padrões de aceleração e desaceleração tornam ineficiente o uso de motores a combustão e ônibus urbanos elétricos produzindo zero emissão de gases e ruídos são exemplos práticos disso. [5]

## 2.2. CARACTERÍSTICAS DOS CHASSIS FABRICADOS COM EMPREGO DE LIGAS DE AL

### 2.2.1. Busca da Redução de Peso

A competição entre materiais no mercado automotivo é tradicionalmente intensa, mas tem se acentuando nos últimos anos. A necessidade crescente em reduzir o consumo de combustível, motivada pela preocupação dos países com os problemas ambientais e energéticos, tem grande influência na escolha dos materiais. Então, provocada por tais requisitos, a indústria automotiva tem se dedicado no aperfeiçoamento da eficiência dos motores a combustão, no desenvolvimento de carros híbridos, carros elétricos e materiais que reduzam o peso dos veículos. [16]

A ideia de redução de peso é importante, pois, além da direta influência na economia de combustível, é possível utilizar menores peças com maior eficiência para um mesmo desempenho, aumentando ainda mais a economia de combustível. Além disso, a tendência do mercado é uma busca por veículos de maior conforto, desempenho e segurança, e, por isso, existe uma predisposição que esse peso continue aumentando devido à demanda dos consumidores. As indústrias automotivas já estão na busca da redução de peso de seus carros, já que uma redução de 10% no peso gera um aumento da economia de combustível de 8 – 10%, ou um aumento na autonomia no caso dos veículos elétricos [16].

Devido a isso, o uso de ligas de alumínio para as aplicações na indústria automotiva aumentou mais de 80% nos últimos 5 anos. Em 1996 foram utilizados cerca de 110 kg de alumínio em veículos e em 2015 o consumo chegou próximo dos 340 kg [17]. Há algum tempo, peças de ferros fundidos e de aços estão sendo substituídas por ligas de alumínio, como por exemplo, peças de motor, pistões e algumas partes da transmissão. [16]

As ligas de magnésio são fortes concorrentes com as ligas de alumínio e compósitos quando o assunto é baixa densidade. O magnésio é 33% mais leve que o alumínio e 75% mais leve que os aços e ferros fundidos. Além disso, a resistência à corrosão de ligas com alto teor de Mg é superior às das ligas convencionais de Al na condição fundida. Por outro lado, as ligas de Mg levam desvantagem nas propriedades mecânicas, principalmente quando envolve aplicações que exigem alta resistência, como é o caso da indústria automotiva. No geral, essas ligas são dúcteis, possuem limite elástico próximo das ligas de Al, mas tem menor resistência à tração (25% menor) e menor limite de resistência à fadiga (35% menor). [18]

Outros materiais buscando um mesmo objetivo estão sempre surgindo, mas sempre enfrentam barreiras iniciais até que sejam realmente viáveis para aplicações em peças que necessitam de um custo razoável e uma produção de alta escala. São exemplos desses materiais os aços avançados de alta resistência e compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono. [18] Porém, esses materiais acabam possuindo um custo elevado, tanto de produção do material, quanto de produção das peças. [19]

Com o avanço tecnológico e o desenvolvimento de melhores maneiras de produção desses materiais, a tendência é uma redução do custo de produção. Contudo, ainda hoje esses materiais acabam tendo aplicações mais nobres, em setores que o custo é menos importante que o desempenho, normalmente em veículos para competições, como os carros de corrida da Fórmula 1 e Formula E. Dessa forma, as ligas de alumínio ainda segue sendo o material de maior escolha, seguido das ligas de magnésio, com propriedades mecânicas Inferiores. [18-19]

Recentemente as ligas de alumínio forjadas estão ganhando espaço na aplicação em veículos, se tornando até mais aplicadas que ligas de alumínio fundido. Um exemplo é a utilização de rodas forjadas, preferíveis em situações em que a aplicação expõe a esforços mais extremos, requerendo melhores propriedades mecânicas. No geral, essas ligas têm aplicações em escudos térmicos, reforço de para-choques, compartimento de airbags, cárter, armações de assentos, entre outras aplicações [7].

As vantagens das ligas de Al forjadas são suas melhores propriedades mecânicas comparadas com as ligas fundidas. Para que seja produzido em alta escala, é necessário que as ligas sejam fundidas pelo processo de fundição sob pressão. Isso faz com que as peças produzidas possam apresentar defeitos que não permitam que as ligas sejam tratadas termicamente. Mas isso está sendo mudado com o avanço tecnológico sob o processo de fundição sob alta pressão. [20]

### **2.2.2. Tipos de Chassis**

A carroceria de veículos, ou *body-in-white* (BIW), é o componente veicular onde há possibilidade da utilização de grande quantidade de alumínio. A substituição de BIW construídos de aço por ligas de alumínio pode gerar uma redução de 50% de peso na carroceria segundo desenvolvimentos recentes [21]. Essa redução pode chegar a representar cerca de 20-30% em redução total de peso do veículo quando adicionadas outras oportunidades de redução (redução de peso de outras peças). [7]

Basicamente existem dois tipos de *design* no uso de ligas de alumínio de forma estrutural em veículos, cada uma com uma filosofia diferente em sua aplicação. Uma é usá-las de uma forma similar ao que já é feito com os aços, por meio da estampagem e arquitetura monobloco com chapas do material. E outra é a chamada *extruded space frame*, que consiste na produção de peças por fundição, extrusão e estampagem, utilizando operações de soldagem para unir as partes [7, 21].

A estrutura BIW *space frame*, como pode ser vista na Figura 4, oferece algumas vantagens, como menores custos de equipamento e menor necessidade de estampagem do alumínio. Porém, é necessária toda uma alteração estrutural nas fábricas para adaptarem este projeto às linhas de produção. Essa estrutura, feita de ligas de alumínio, é construída por chapas estampadas unidas a peças fundidas e extrudadas, sendo considerada mais apropriada para produção de baixo volume. A fábrica da Audi produzia 80 carros por dia, devido a uma grande quantidade de peças a serem soldadas e unidas. O peso total da estrutura BIW era de 250 kg. [6]

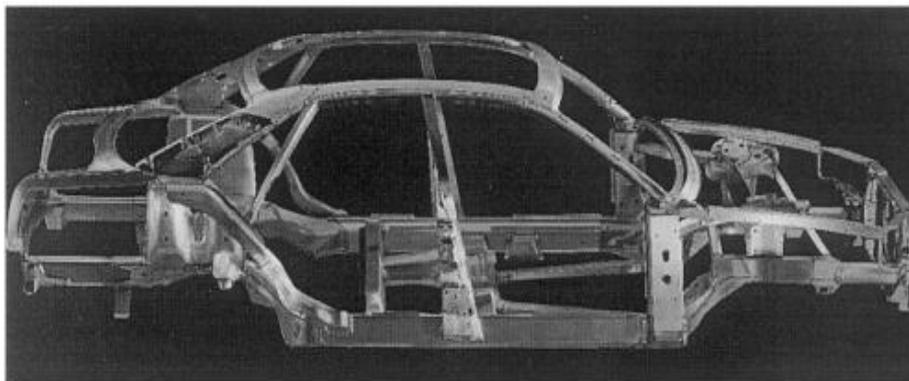


Figura 4: Arquitetura de chassi BIW *space frame* utilizando de liga de alumínio extrudado. Alcoa-Audi A8. [7]

Outro exemplo da utilização dessa arquitetura *space frame* com aplicação de Al extrudado é o Audi AL2, exibido na Figura 5. Esse exemplo conta com um desenvolvimento de projeto mais otimizado a partir das experiências anteriores, como a do Audi A8. Assim, foi projetado uma estrutura BIW visando reduzir o número de peças a serem unidas e simplificando o projeto. Com menos juntas de alumínio fundido, substituídas por ligações diretas, e com extrusões feitas do modo mais reto possível, já era viável a produção de 300 carros por dia. A aplicação do alumínio acabou se tornando mais eficaz com um peso total da estrutura BIW de 160 kg. [6-7]

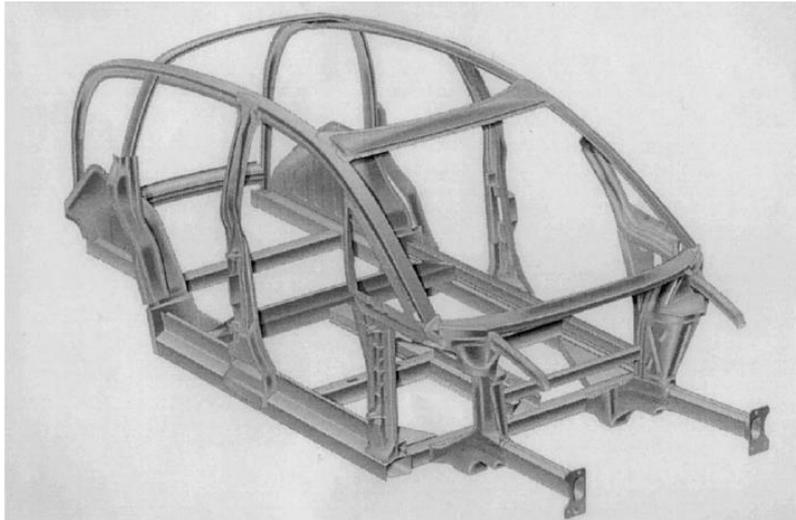


Figura 5: Arquitetura de chassi automotivo *space frame* produzida integralmente de ligas de alumínio. Audi AL2. [7]

Já no caso da arquitetura monobloco, tem como vantagem o processo já bem estabelecido nas fabricas e um custo de peças inferior. Isso porque segue o processo já pré-estabelecido pelos aços na produção das mesmas estruturas monobloco. O exemplo da Figura 6 é de um Ford P2000 que utiliza essa ideia na arquitetura monobloco utilizando ligas de alumínio, chamada de *aluminium intensive vehicle* (AIV). [7]

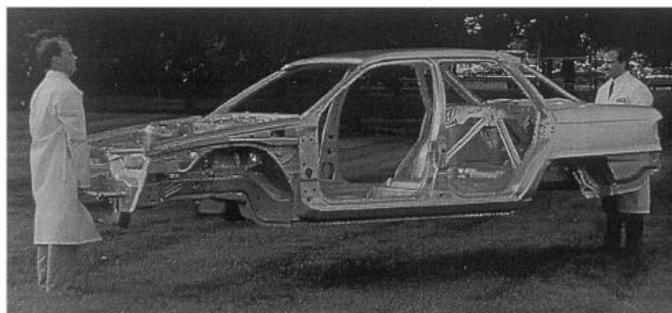


Figura 6: Chassis Alcan-Ford P2000 e sua arquitetura monobloco AIV. [7]

As ideias, mostradas nas Figuras 4, 5 e 6, trouxeram uma redução de peso considerável, de 40% em relação a carroceria convencional, o que pode reduzir o consumo de combustível de 20% a 30% em carros a combustão interna. [7, 21]

Apesar de serem ideias retiradas de carros movidos a combustão, o mesmo caminho é seguido para os veículos elétricos, com pequenas alterações devido aos menores motores e maior influência no peso das baterias. No caso dos carros elétricos, a principal diferença é que a redução do peso é importante no aumento da autonomia. Dessa forma, o uso de ligas de alumínio de forma estrutural acaba sendo essencial para que esse tipo de tecnologia passe a ser cada dia mais atraente aos consumidores [4-5]. Como justificado na Figura 7, com uma imagem do padrão que será base para 23 veículos elétricos produzidos pela *Hyundai* até 2025, aproveitando ao máximo os espaços internos e energia armazenadas nas baterias [22].



Figura 7: Visão geral da estrutura dos veículos elétricos da *Hyundai*. [22]

### 2.2.3. Características Importantes para um Chassi Leve

Ao comparar materiais para uma aplicação específica é necessário determinar as propriedades de maior importância. Para isso, devem ser entendidos os esforços e situações aos quais o componente será exposto. A simplificação e os cálculos a seguir tem como intenção obter relações de propriedades a fim de minimizar a massa do chassi, tendo sido retirado do livro *Materials: engineering, science, processing and design* de ASHBY et al. [23]

O caso do chassi pode ser simplificado e aproximado para o caso de uma placa plana, ou um painel, sofrendo constantemente esforços de flexão, como representado na Figura 8. Além disso, um papel importante do chassi é garantir a integridade dos

usuários do veículo, podendo absorver ao máximo a energia de possíveis impactos, além de ser resistente a ambientes corrosivos.

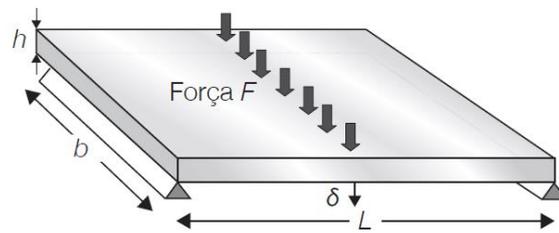


Figura 8: Painel carregado sob flexão. [23]

O interesse no caso do chassi é minimizar a massa do painel, não perdendo a rigidez necessária. No caso, a massa do painel pode ser expressa como:

$$m = b \cdot h \cdot L \cdot \rho$$

Fazendo uma consideração em que a rigidez à flexão do painel deve ser no mínimo  $S^*$  [23], temos:

$$S = \frac{C_1 \cdot E \cdot I}{L^3} \geq S^*$$

onde,  $C_1$  é a constante que depende da distribuição das cargas,  $E$  o módulo de Young e  $I$  o momento de segunda ordem de área, que pra uma seção retangular é:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Dessa forma, temos:

$$S = \frac{C_1 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{12 L^3}$$

Imaginando que  $L$  e  $b$  sejam componentes predeterminadas no projeto, somente  $h$  é uma variável na equação acima. Dessa forma, substituindo  $h$  pela equação da massa do painel, temos:

$$m = \left( \frac{12S^*}{C_1 b} \right)^{\frac{1}{3}} (bL^2) \left( \frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}} \right)$$

Restrição funcional —————>  $\left( \frac{12S^*}{C_1 b} \right)^{\frac{1}{3}}$

Restrições geométricas —————>  $(bL^2)$

Propriedades do material —————>  $\left( \frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}} \right)$

Diante disso, tendo como intenção minimizar a massa do painel, devemos maximizar a relação:

$$M = \frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho}$$

Fazendo o mesmo cálculo com restrição de resistência, temos:

$$M = \frac{\sigma_y^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

onde,  $\sigma_y$  é o limite de escoamento e  $\rho$  a densidade do material.

Com isso, é possível utilizar essas relações de propriedades, chamados índices de mérito, para classificar os materiais candidatos. Além disso, utilizar propriedades de interesse, como tenacidade, limite de resistência à fadiga e propriedades qualitativas de corrosão, além do custo do material, conformabilidade, soldabilidade e fatores ambientais.

### 2.3. LIGAS CANDIDATAS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Determinar e classificar as melhores ligas para cada determinada aplicação não é uma tarefa simples. Quando o assunto é a estrutura da carroceria de automóveis existem diversas funções secundárias dentro desse objetivo primário. Como nas estruturas já vistas, existem partes extrudadas, partes forjadas, partes estampadas e partes fundidas, todas exigindo características e propriedades diferentes. No caso dos painéis dos chassis, por serem fabricados a partir de chapas a serem estampadas, além da necessidade básicas de resistência mecânica, é importante que possuam uma conformabilidade e uma alta qualidade da superfície após a prensagem e o acabamento da pintura. Conseqüentemente, as ligas 6xxx, endurecidas pela precipitação de fases (envelhecimento) na etapa da pintura, são a principal escolha para essas aplicações. Já para os materiais estruturais de chapas e extrudados, a resistência pode ser um fator limitante em certas áreas. A absorção de energia de impacto e o bom comportamento no processo de extrusão são frequentemente aspectos importantes. Para atender a esses requisitos, as ligas 5xxx

são usadas principalmente na América do Norte. Na Europa, os materiais 6xxx-T4 ainda são aqueles mais amplamente utilizados. [7-8]

Dessa forma, os materiais da série 6000 são bons candidatos em aplicações estruturais em veículos, tanto como chapas, quanto como extrudados. Essas ligas são forjadas e tratadas termicamente, devido à presença de magnésio e silício, que formam o intermetálico silicato de magnésio ( $Mg_2Si$ ). A formação dessa fase proporciona o endurecimento dessas ligas proporcional à quantidade, distribuição e morfologia destes elementos no material. As ligas da série 6000 encontraram amplas aplicações em soldagem e componentes estruturais devido a sua excelente resistência à corrosão, resistência mecânica e boa conformabilidade [24-25].

Quantidades cada vez maiores de aço são fornecidas com revestimento de zinco para alcançar durabilidade aceitável da pintura, operação não necessária no caso de ligas de alumínio. No entanto, a bobina ou chapa de liga de alumínio pode ser fornecida com uma variedade de camadas de pré-tratamento e pinturas que podem melhorar a conformabilidade, a qualidade da superfície e podem eliminar a necessidade de revestimentos. [7-8]

Dentro desse grupo de ligas de alumínio, existem ligas específicas que cumprem estes pré-requisitos e são constantemente testadas e aplicadas em partes estruturais de veículos. As principais ligas aplicadas a partir das chapas são: 6009, 6010, 6016 e 6111, geralmente aplicadas como painéis laterais ou como chão das carrocerias. E, as principais ligas aplicadas de forma extrudada são: 6061, 6063, 6070 e 6082, geralmente aplicadas como componentes estruturais dos veículos. [6-7]

Essas ligas passam por tratamento térmico para que atinjam a resistência requisitada. Podem ser submetidas ao tratamento térmico de solubilização (T4) ou envelhecimento (T6). O tratamento de solubilização (T4) ocorre em torno de 500 °C, sendo que a essa temperatura todas as fases precipitadas se solubilizam na matriz de alumínio, produzindo uma microestrutura monofásica após resfriamento rápido em água. Pode ocorrer um envelhecimento natural, em temperatura ambiente, após esse tratamento ou tratamento de envelhecimento artificial (T6), que é feito após o tratamento térmico T4, o qual ocorre em torno de 180 °C, proporcionando a precipitação do composto intermetálico  $Mg_2Si$  na matriz rica em alumínio, endurecendo a liga. [6, 8]

A Figura 9 mostra microestruturas da liga 6013 após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial retirado do trabalho WANG et al. [9]

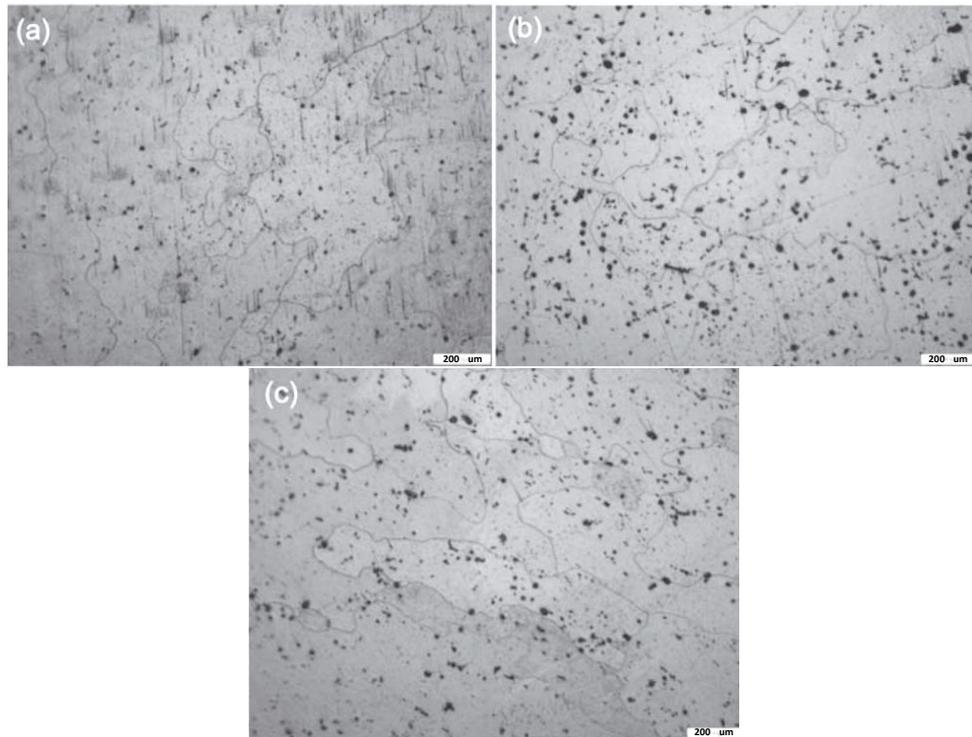


Figura 9: Micrografias da liga 6013-T6 variando concentração de magnésio, sendo (a) 0,95% em peso, (b) 1,0% em peso e (c) 1,15% em peso de Mg. [26]

A variação no teor de Mg nas micrografias da Figura 9 propõe uma análise dos extremos da composição desse elemento de liga previsto em norma, que é de 0,8 até 1,2% em peso de Mg. Dessa forma, é possível ver através das micrografias da Figura 9 que existe uma variação na microestrutura com pequenas variações de composição, que irá refletir no final nas propriedades mecânicas da liga. [26]

### 3. METODOLOGIA

Para a comparação das ligas da série 6000 na possível aplicação estrutural em chassis de veículos elétricos, foram selecionadas 13 ligas dessa série. Dessas 13 ligas, oito foram as ligas já mencionadas por estarem presentes na literatura como ligas utilizadas para essa aplicação, sendo as ligas 6009, 6010, 6016, 6061, 6063, 6070, 6082 e 6111 [6-7]. As outras cinco ligas foram as ligas 6005A, 6013, 6022, 6060 e 6066. As ligas selecionadas foram todas consideradas nas condições de tratamento térmico T4 e/ou T6, por serem as condições apresentadas pelas ligas citadas na literatura [6-7].

A obtenção de resultados para comparação dessas ligas seguiu quatro etapas. A primeira etapa foi a apuração da composição de cada uma das ligas a partir do software *GRANTA Edupack* e uma breve explicação de como a variação de alguns elementos podem proporcionar alterações na microestrutura e nas propriedades das ligas. Por isso, foi utilizado o software *Thermo-Calc*<sup>®</sup> com base de dados TCAL7 para obter dados sobre a formação das fases e a variação da fração molar das fases em função da variação do teor de elementos de liga. Os cálculos no software foram feitos utilizando os valores máximos de teor dos elementos de liga de maior importância, como, magnésio, silício e cobre.

A segunda etapa foi a comparação das ligas com bases em propriedades mecânicas consideradas importantes para a aplicação requerida. As propriedades analisadas foram: módulo elástico, limite de escoamento, resistência à fadiga, tenacidade, densidade e propriedades de corrosão. Todos os dados acerca das propriedades listadas foram retirados do software *GRANTA Edupack* através de mapas de propriedades ou tabelas. O módulo elástico, o limite de escoamento e a densidade fizeram parte de mapas que tiveram a função de expressar os índices de mérito anteriormente expostos (item 2.2.3) e, a partir disso, foram eliminadas ligas que apresentaram índices de mérito inferiores as das ligas que foram identificadas como candidatas na literatura especializada. Nessa etapa, também foram utilizados os resultados das simulações do *Thermo-Calc*<sup>®</sup> para justificar outros resultados obtidos nos mapas de propriedades de Ashby.

A terceira etapa consistiu na análise de dados sobre a capacidade de processamento e de soldagem das ligas mantidas como candidatas. Esses dados foram adquiridos na forma de gráficos plotados no software *GRANTA Edupack* com o eixo das ordenadas fixado o parâmetro do preço das ligas segundo este software. Dessa forma, as ligas foram comparadas de acordo com a facilidade ou capacidade de serem processadas por trabalho à frio, trabalho à quente e estampagem. Pela necessidade da junção das peças produzidas por esses tipos de processamento, também foi analisado a soldabilidade das ligas.

A quarta e última etapa foi a análise no impacto ambiental das ligas. Nessa etapa foi utilizada a ferramenta *Eco Audit* do software *GRANTA Edupack*. Essa ferramenta uniu informações sobre gastos energéticos e de emissão de gás CO<sub>2</sub> na produção das ligas e processamento por extrusão a quente. As ligas candidatas foram comparadas em relação ao alumínio comercialmente puro, usado como parâmetro, e comparadas pela diferença em suas condições de tratamento térmico.

Por fim, as médias das propriedades obtidas das etapas citadas foram unidas em uma tabela para comparação e classificação das ligas em três cenários: melhor desempenho, melhor processabilidade e menor impacto ambiental para analisar as melhores ligas em cada um dos cenários. Como ferramenta de classificação foi utilizado o método *TOPSIS* [27] pontuando cada uma das ligas em relação as suas propriedades e os pesos dados em cada cenário.

## 4. RESULTADOS

Inicialmente, é importante entender a diferença fundamental entre as ligas de interesse, sua composição química. A Tabela 1 mostra detalhadamente a faixa de composição de cada uma das ligas analisadas. As informações sobre os teores de cada elemento químico presentes nas ligas descritos na Tabela 1 foram retiradas do software *GRANTA Edupack*. A variação nos elementos de liga principais, Mg, Si Cu e Mn, podem alterar propriedades importantes, como resistência mecânica, ductilidade, rigidez e tenacidade. Como consequência, essa variação pode alterar a facilidade com que essas ligas são conformadas e processadas, e, além disso, pode alterar o preço dos materiais e os custos de produção.

Tabela 1: Faixas de composição química das ligas da série 6xxx candidatas retiradas do software *GRANTA Edupack*.

Composição das Ligas										
Ligas	%Mg	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Cr	%Zn	%Ti	%Outros	%Al
6005A	0,4 - 0,7	0,5 - 0,9	0 - 0,35	0 - 0,3	0 - 0,5	0 - 0,3	0 - 0,2	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço
6009	0,4 - 0,8	0,6 - 1	0 - 0,5	0,15 - 0,6	0,2 - 0,8	0 - 0,1	0 - 0,25	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço
6010	0,8 - 1,2	0,6 - 1	0 - 0,5	0,15 - 0,6	0,2 - 0,8	0 - 0,1	0 - 0,25	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço
6013	0,8 - 1,2	0,6 - 1	0 - 0,5	0,6 - 1,1	0,2 - 0,8	0 - 0,1	0 - 0,25	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço
6016	0,25 - 0,6	1 - 1,5	0 - 0,5	0 - 0,2	0 - 0,2	0 - 0,1	0 - 0,2	0 - 0,15	0 - 0,15	Balanço
6022	0,25 - 0,6	1 - 1,5	0,05 - 0,2	0,01 - 0,11	0,02 - 0,1	0 - 0,1	0 - 0,25	0 - 0,15	0 - 0,15	Balanço
6060	0,35 - 0,6	0,3 - 0,6	0,1 - 0,3	0 - 0,1	0 - 0,1	0 - 0,05	0 - 0,15	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço
6061	0,8 - 1,2	0,4 - 0,8	0 - 0,7	0,15 - 0,4	0 - 0,15	0,04 - 0,35	0 - 0,25	0 - 0,15	0 - 0,15	Balanço
6063	0,45 - 0,9	0,2 - 0,5	0 - 0,35	0 - 0,1	0 - 0,1	0 - 0,1	0 - 0,1	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço
6066	0,8 - 1,4	0,9 - 1,8	0 - 0,5	0,7 - 1,2	0,6 - 1,1	0 - 0,4	0 - 0,25	0 - 0,2	0 - 0,15	Balanço
6070	0,5 - 1,2	1 - 1,7	0 - 0,5	0,15 - 0,4	0,4 - 1	0 - 0,1	0 - 0,25	-	0 - 0,15	Balanço
6082	0,6 - 1,2	0,7 - 1,3	0 - 0,5	0 - 0,1	0,4 - 1	0 - 0,25	0 - 0,2	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço
6111	0,5 - 1	0,6 - 1,1	0 - 0,4	0,5 - 0,9	0,1 - 0,45	0 - 0,1	0 - 0,15	0 - 0,1	0 - 0,15	Balanço

Dessa forma, para melhor visualização do quanto a composição das ligas altera a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades das ligas foram feitas simulações das ligas pelo software *Thermo-Calc*<sup>®</sup> a fim de quantificar essa variação da microestrutura quando o material encontra é processado em condições de equilíbrio. A Tabela 2 traz, de forma resumida, os dados das frações das fases Mg<sub>2</sub>Si e Al-α a 600K retirados do software.

Tabela 2: Fração molar das fases Mg<sub>2</sub>Si e Al-α a 600k das ligas da série 6xxx candidatas simuladas pelo software *Thermo-Calc*<sup>®</sup>.

Fração de Fases (% molar)			
Ligas	Fase Mg <sub>2</sub> Si	Fase Al-α	Outras Fases
<b>6005A</b>	1,2 %	98,8 %	-
<b>6009</b>	1,4 %	97,0 %	1,6 %
<b>6010</b>	2,0 %	97,0 %	1,0 %
<b>6013</b>	1,7 %	96,5 %	1,8 %
<b>6016</b>	1,0 %	98,8 %	0,2 %
<b>6022</b>	1,1 %	98,7 %	0,2 %
<b>6060</b>	0,9 %	99,0 %	0,1 %
<b>6061</b>	1,7 %	98,0 %	0,3 %
<b>6063</b>	1,4 %	98,6 %	-
<b>6066</b>	2,2 %	95,5 %	2,3 %
<b>6070</b>	1,9 %	95,8 %	2,3 %
<b>6082</b>	1,9 %	95,7 %	2,4 %
<b>6111</b>	1,8 %	96,5 %	1,7 %

Segundo a Tabela 2, as ligas 6016 e 6060 foram as que apresentaram menor fração da fase intermetálica Mg<sub>2</sub>Si, 1% e 0,9% molar respectivamente. Enquanto as ligas 6066 e 6010 foram as que apresentaram maior fração dessa fase, 2,2% e 2% respectivamente. Essas informações trazem a possível capacidade de endurecimento das ligas através da precipitação dessas fases através do tratamento térmico de envelhecimento, o que pode ser mais importantes mais à frente neste trabalho. [8]

As outras fases são referentes a fases como Al<sub>2</sub>Cu, AlMnSi e intermetálicos com ferro em sua estrutura, como Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> ou Al<sub>15</sub>(Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>.

A Figura 10 representa um exemplo da simulação feita através do software *Thermo-Calc*<sup>®</sup> da qual foram retiradas informações das frações de fases da Tabela 2. A Figura 10 representa um gráfico de fração de fases em equilíbrio em função da temperatura.

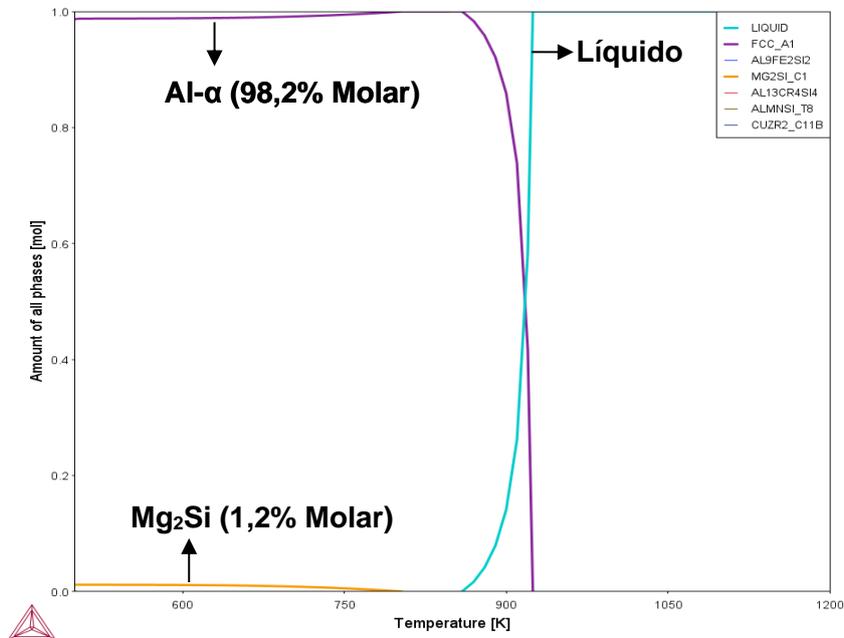


Figura 10: Gráfico de fração de fases (% molar) por temperatura (K) da liga 6005A obtido através do software *Thermo-Calc*<sup>®</sup>.

#### 4.1. PROPRIEDADES DE APLICAÇÃO

Objetivando a comparação e identificação das melhores ligas para aplicação em chassis de veículos elétricos é necessário visualizar como a variação na composição química das ligas pode proporcionar variações em termos das propriedades mecânicas relevantes para os chassis.

Como descrito no item 2.2.3 desse trabalho, para um painel rígido, resistente e leve submetido a esforços de flexão, é interessante maximizar os seguintes índices de mérito:

$$M = \frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho} \quad e \quad M = \frac{\sigma_y^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

Dessa forma, é possível identificar três propriedades importantes inicialmente: módulo de elasticidade ( $E$ ), limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) e densidade ( $\rho$ ). Com o intuito de comparar as ligas candidatas em relação a essas propriedades, foram obtidos os mapas de propriedades através do *GRANTA Edupack* exibidos conforme mostrado nas Figuras 11 e 12.

A Figura 11 representa a variação do módulo elástico por densidade, enquanto a Figura 12 mostra um gráfico de limite elástico por densidade.

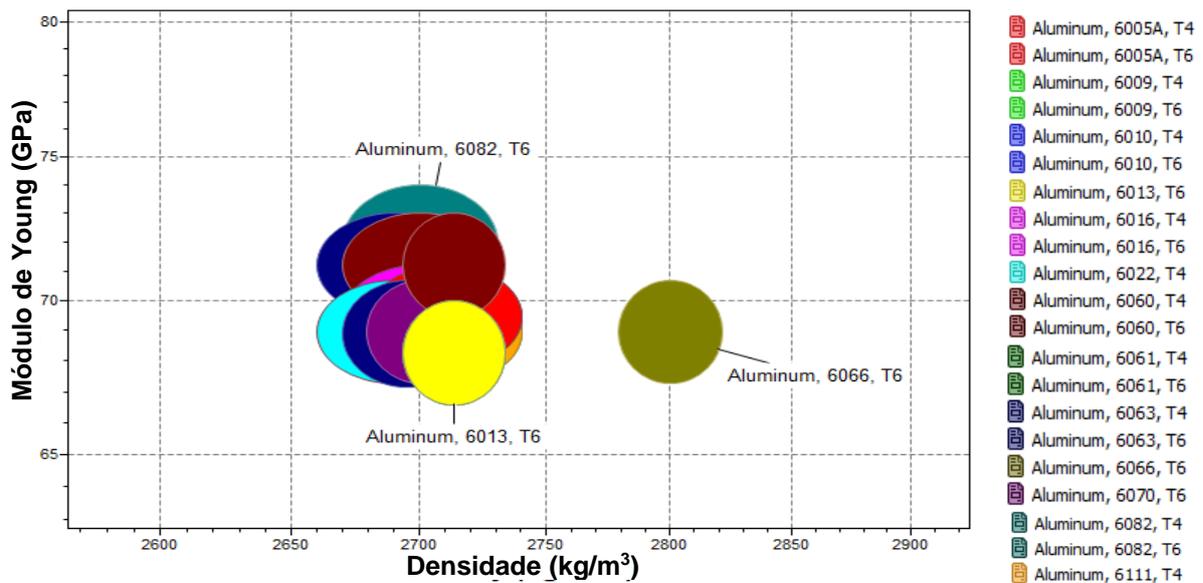


Figura 11: Mapa de propriedades das ligas da série 6xxx, relação módulo elástico x densidade feito utilizando o software *GRANNTA Edupack*.

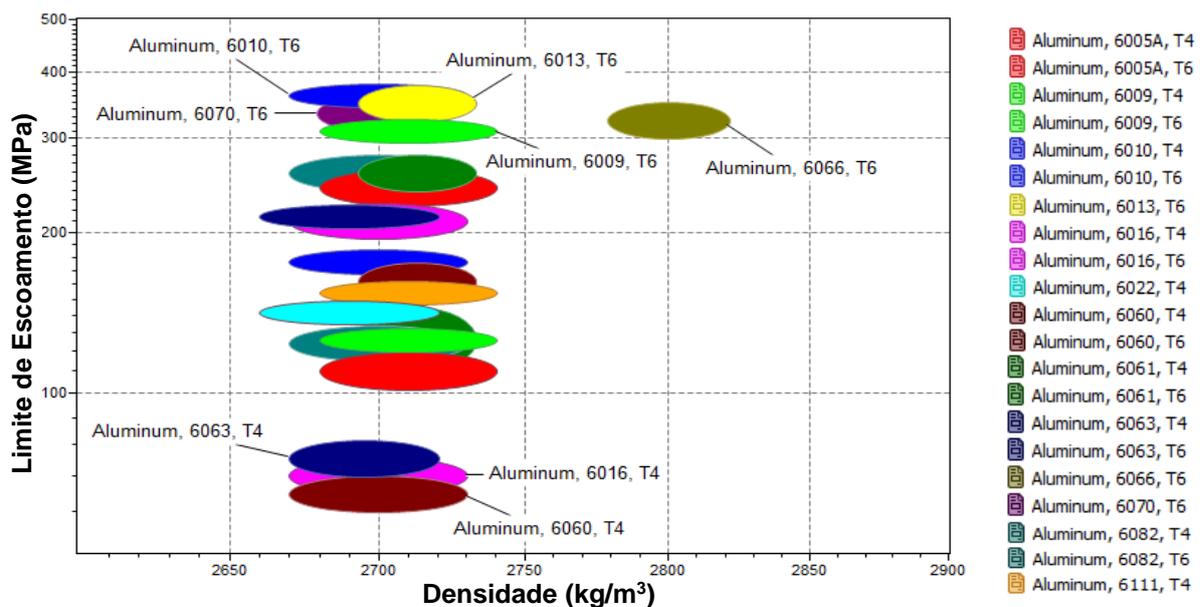


Figura 12: Mapa de propriedades das ligas da série 6xxx, relação limite elástico x densidade feito utilizando o software *GRANNTA Edupack*.

Por serem ligas de mesma série e possuírem relativo baixo teor de elementos de liga, a densidade não tem grandes variações, entre 2,66 g/cm<sup>3</sup> e 2,74 g/cm<sup>3</sup>. Somente a liga 6066 apresentou uma densidade maior que as outras, entre 2,78 g/cm<sup>3</sup> e 2,83 g/cm<sup>3</sup>. Isso se deve provavelmente ao maior teor de cobre e manganês como elementos de liga, o que não é visto nas demais ligas.

Outro fator interessante visto nos mapas é que o módulo de elasticidade tem uma variação baixa, enquanto o limite de resistência tem grande variação. A variação do limite de resistência tem relação com a variação da fração das segundas fases presentes na microestrutura do material (fase endurecedora, Mg<sub>2</sub>Si) provenientes do tratamento térmico aplicado. Já o módulo elástico é dependente da estrutura atômica do material. A presença de elementos de liga pode causar uma variação dessa propriedade, porém, pouco notória em comparação ao limite de escoamento.

A partir dos mapas e dos índices de mérito, é possível plotar linhas que representam o limite mínimo dos valores de índice de mérito que as ligas devem apresentar. Como os mapas estão em escala logarítmica as linhas se tornam retas que seguem a mesma relação algébrica dos índices de mérito, com um coeficiente angular e um coeficiente linear. Assim, podemos obter as linhas de índice de mérito para o problema de um painel leve da seguinte forma:

$$M = \frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho} \rightarrow \log(M) = \frac{\log(E)}{3} - \log(\rho)$$

Considerando  $\log(E)$  sendo  $y$  e  $\log(\rho)$  sendo  $x$ , temos:

$$y = 3x + 3 \log(M)$$

Da mesma forma para o limite de escoamento, sendo  $y$   $\log(\sigma_y)$ :

$$M = \frac{\sigma_y^{\frac{1}{2}}}{\rho} \rightarrow y = 2x + 2 \log(M)$$

Dessa forma, foram plotadas retas nos mapas das Figuras 11 e 12 representando a relação de propriedades obtidas nos índices de méritos anteriormente expostos. O resultado disso é mostrado na Figura 13.

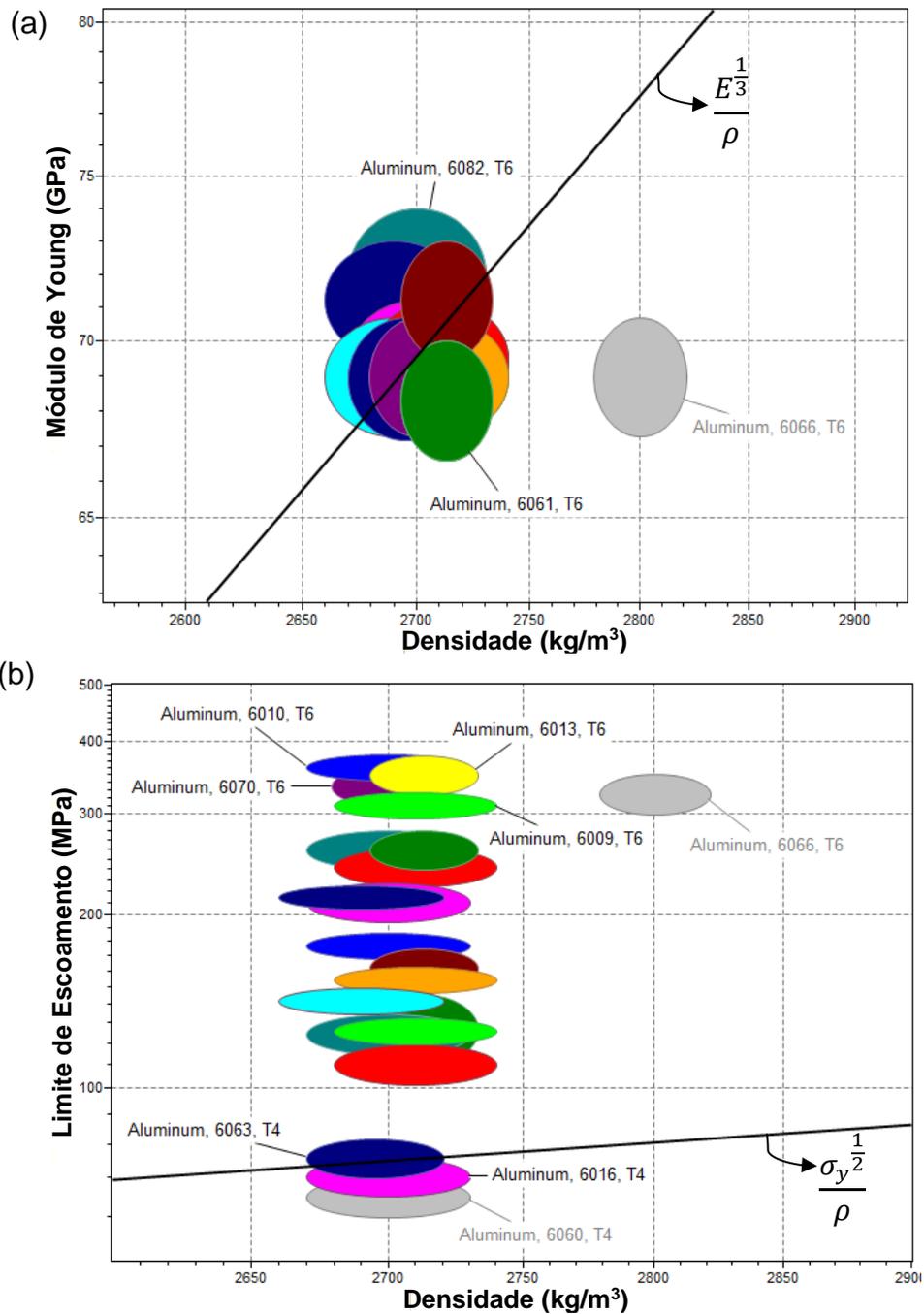


Figura 13: Mapas de propriedades das ligas da série 6xxx com suas respectivas linhas de índice de mérito retiradas do software *GRANTA Edupack*.

O posicionamento das linhas foi feito seguindo as relações de propriedades anteriormente estabelecidas considerando como limite, em cada caso, a pior liga candidata retirada da literatura (6061-T6 na Figura 13a e 6016-T4 na Figura 13b). Dessa forma, as ligas 6066-T6 e 6060-T4 foram desclassificadas por possuírem índices de mérito abaixo dessas outras ligas.

A liga 6066-T6 foi desclassificada devido sua rigidez específica ter sido a menor dentre as ligas. Apesar de seu módulo elástico não ser inferior, a liga 6066-T6 apresenta uma densidade superior as outras ligas devido à presença de cobre ( $\rho_{Cu} = 8,96 \text{ g/cm}^3$ ) e manganês ( $\rho_{Mn} = 7,4 \text{ g/cm}^3$ ) como elementos de liga.

Já a liga 6060-T4, além de ser uma das ligas com menores teores de elementos de ligas e por estar na condição de tratamento térmico T4, ou seja, tratamento de solubilização e envelhecimento natural, faz com que seu limite de escoamento seja o pior dentre todas as ligas, entre 60 e 70 MPa. O fato de ser uma liga com baixo teor de elementos de liga faz com que essa liga tenha uma fração inferior da fase intermetálica  $Mg_2Si$ , como visto na Tabela 2. A Figura 14 mostra a simulação feita para liga 6060 e traz informações das frações de fases presentes em equilíbrio por temperatura.

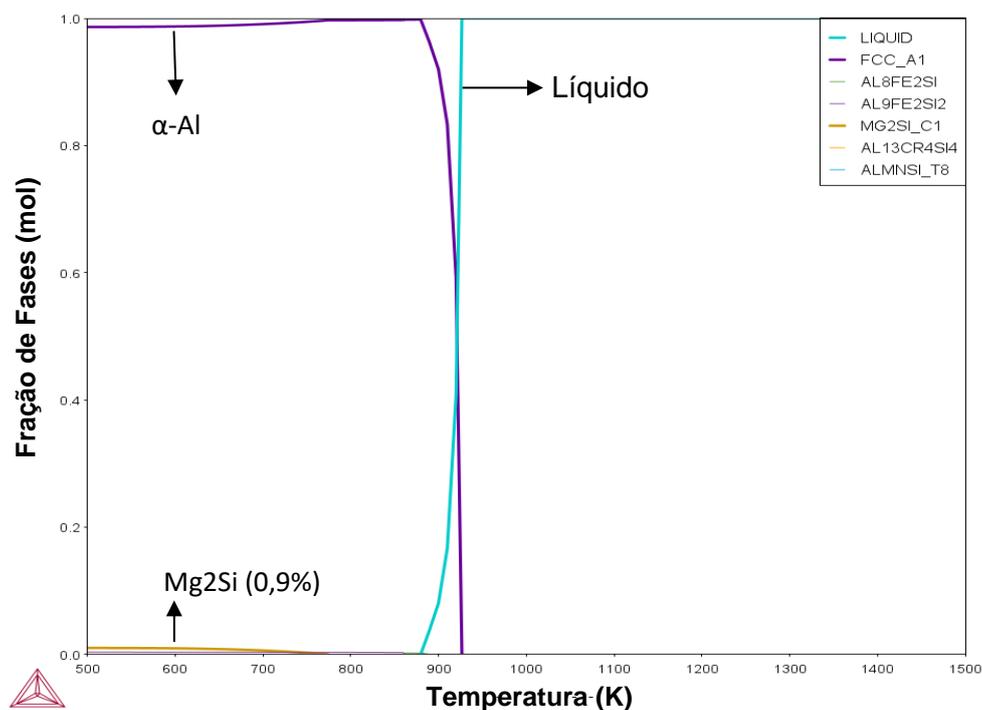


Figura 14: Gráfico de fração de fases (% molar) por temperatura (Kelvin) da liga 6060 produzido pelo software *Thermo-Calc*®.

Para a liga 6060 é possível obter somente 0,9% molar da fase endurecedora  $Mg_2Si$ , enquanto para outras ligas essa porcentagem pode chegar em mais de 2%. Além disso, o fato de estar na condição T4 faz com que a presença dessa fase na microestrutura do material seja ainda menor, contribuindo para um limite de escoamento inferior.

Além das propriedades de rigidez e resistência, os materiais candidatos a serem aplicados em chassis devem garantir a segurança dos condutores em todas as situações possíveis. Em uma situação extrema de um acidente de trânsito, o chassi é uma das partes das quais devem absorver o máximo de energia para que o impacto seja minimizado nos ocupantes do veículo. Por isso, a tenacidade do material é uma propriedade importante. A Figura 15 mostra a faixa de tenacidade desses materiais.

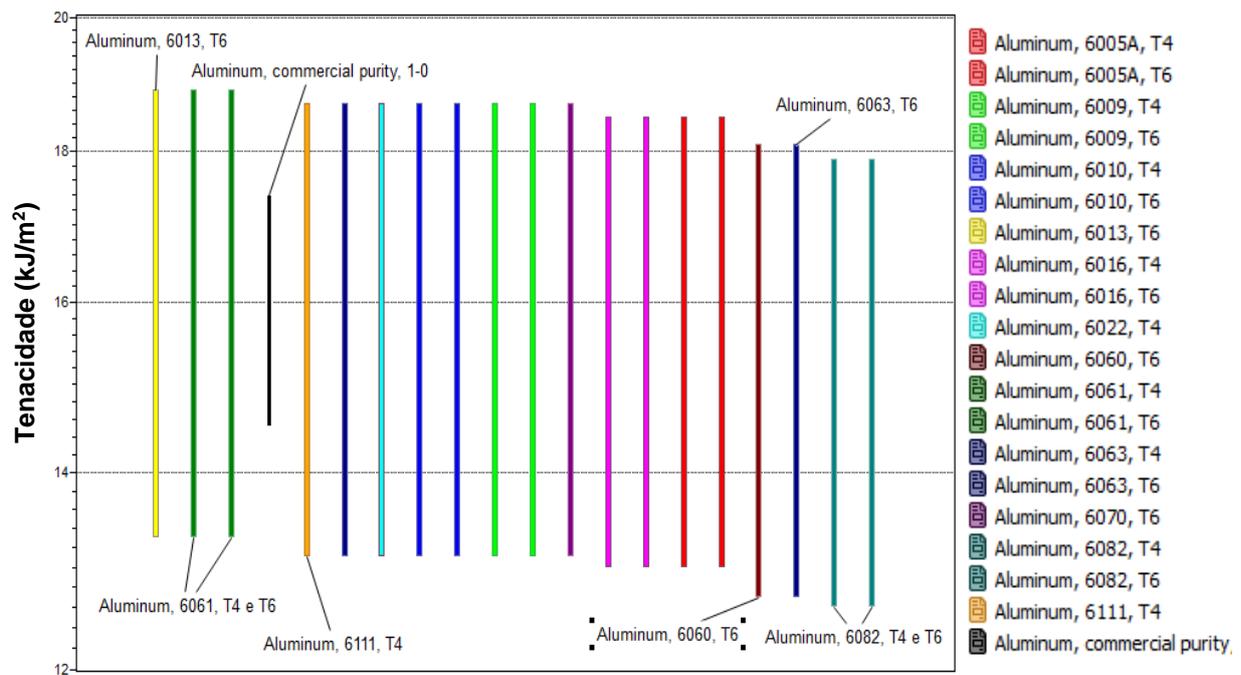


Figura 15: Faixa de tenacidade das ligas da série 6xxx em kJ/m<sup>2</sup>. Gráfico retirado do software *GRANTA Edupack*.

A faixa de tenacidade das ligas apresenta valores próximos, variando entre 13 kJ/m<sup>2</sup> e 19 kJ/m<sup>2</sup>. Todas as ligas têm tenacidade média próxima da liga do alumínio comercialmente puro, somente as ligas 6060-T6, 6063-T6, 6082-T4 e 6082-T6 apresentaram essa média abaixo.

Tendo em vista a função estrutural que os componentes do chassi devem cumprir, a variação no terreno em que os veículos elétricos podem estar sujeitos a enfrentar submete aos materiais candidatos a esforços cíclicos. Então, esse fator exige que as ligas tenham bons resultados quando submetidas a cargas dinâmicas e, por isso, a Figura 16 foi obtida a fim de comparar as ligas em relação a seu limite de fadiga a 10<sup>7</sup> ciclos.

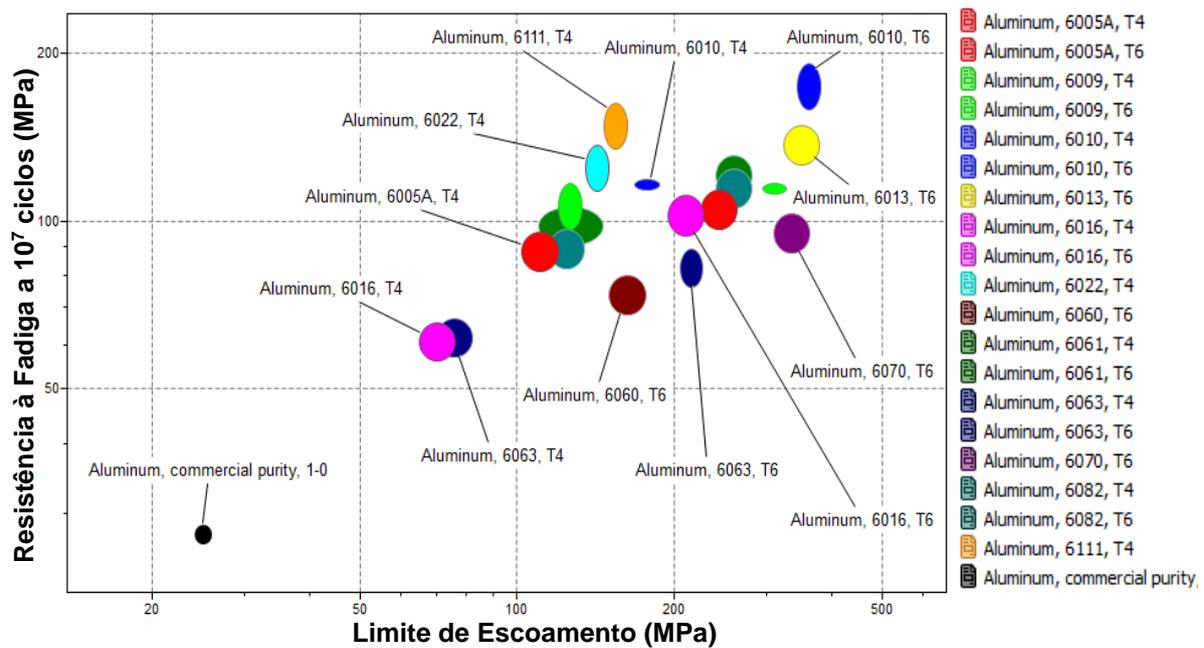


Figura 16: Mapa de propriedades das ligas da série 6xxx, relação limite de fadiga x resistência específica obtido através do software *GRANTA Edupack*.

Diferente da Figura 15, a Figura 16 apresenta uma grande variação nos valores de propriedade. Existe uma tendência das ligas com maior limite de escoamento a possuírem maior resistência à fadiga, como pode ser visto com as ligas 6010-T6 e 6013-T6. Essas duas ligas possuem os maiores valores de limite de escoamento e apresentam, também, excelentes valores de resistência à fadiga. Outra liga que possui ótimos valores dessa propriedade é a liga 6111-T4, que, apesar de possuir menor limite de escoamento e estar na condição T4 de tratamento térmico, está entre as 3 melhores ligas nesse quesito de esforços cíclicos.

Porém, em alguns casos não é visto esse comportamento, como nos casos das ligas 6070-T6, 6063-T6 e 6060-T6. A liga 6070-T6 é uma das três ligas de maior limite de escoamento junto a 6010-T6 e 6013-T6, como pode ser visto na Figura 12, mas sua resistência à fadiga acaba sendo muito baixa em relação as outras, apresentando uma média de 90 MPa enquanto a 6010-T6 uma média de 175 MPa. Um fator em comum das ligas que apresentaram baixos valores de resistência a fadiga foi o baixo teor de cobre em relação com as ligas que apresentaram altos valores dessa propriedade, que é responsável por formar a fase Al<sub>2</sub>Cu.

A Tabela 3 traz a resistência à corrosão das ligas de interesse em sua condição desprotegida a vários ambientes operacionais padrão, categorizados qualitativamente. Essa categorização é feita em quatro escalas: excelente (quando não há deterioração nas propriedades do material), aceitável (resistência suficiente, porém pode ser requerido alguma proteção adicional em longos períodos de exposição), uso limitado (quando não é recomendável, porém pode suportar pequenos períodos) e inaceitável (quando não deve ser utilizado de forma desprotegida). Dessa forma, a Tabela 3 mostra a resistência a corrosão das ligas candidatas nos meios com água fresca, água salgada, solventes orgânicos e ácidos com pH abaixo de 4.

Tabela 3: Resistência a corrosão das ligas da série 6xxx submersas em água, água salgada, solventes orgânicos e ácidos. Dados retirados do *GRANTA Edupack*.

<b>Corrosão</b>				
<b>Ligas</b>	<b>Água Fresca</b>	<b>Água Salgada</b>	<b>Solventes</b>	<b>Ácidos</b>
<b>Al comercialmente puro</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6005A</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6009</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6010</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6013</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6016</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6022</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6060</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6061</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6063</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6070</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6082</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente
<b>6111</b>	Excelente	Aceitável	Excelente	Excelente

Todas as ligas foram categorizadas com resistência a corrosão idênticas pelo *GRANTA Edupack*, como demonstrado na Tabela 3. As ligas de alumínio apresentam excelente resistência a corrosão devido a uma fina camada de óxido, chamada camada passiva, que é formada na superfície do material [28]. Por isso, é possível observar que, em todos os meios, exceto água salgada, as ligas candidatas apresentaram excelente resistência a corrosão. Em água salgada as ligas apresentaram resistência aceitável, ou seja, possuem uma resistência suficiente.

Outro modo de análise do desempenho dessas ligas em termos de corrosão é a medida da resistência do material à corrosão sob tensão (stress corrosion cracking), mostrado na Figura 17. O crescimento de trincas é causado pelos efeitos combinados de estresse e ataque químico, onde o material a ser testado deve ser exposto em ambientes agressivos para si, sofrendo corrosão. Os materiais são classificados e categorizados de forma qualitativa, sendo 4 escalas: não suscetível, pouco suscetível, suscetível e muito suscetível.

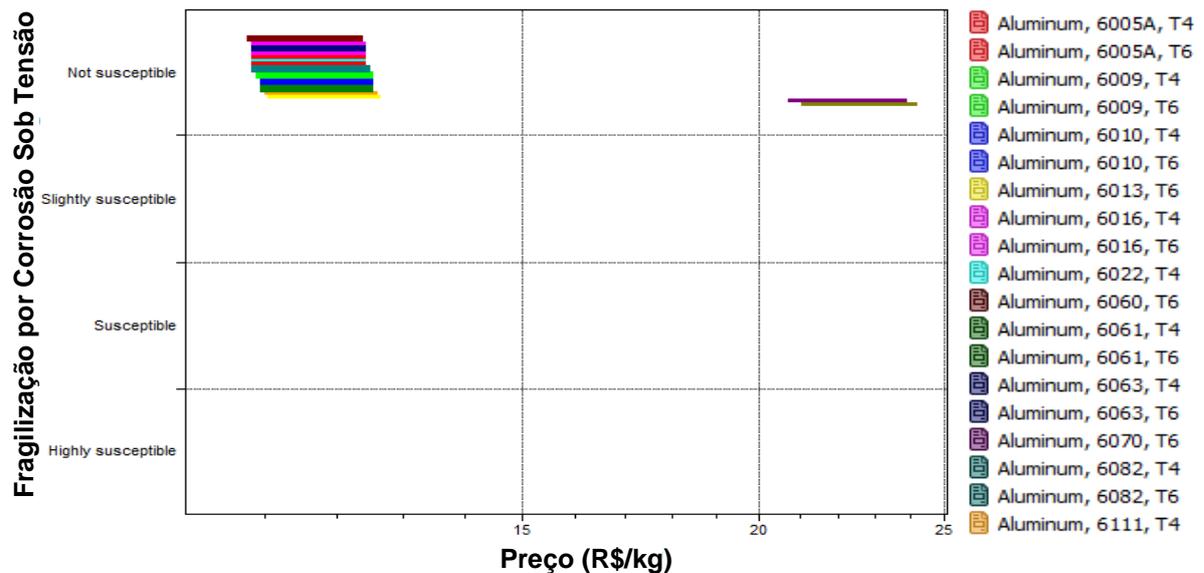


Figura 17: Classificação das ligas da série 6xxx em termos de suscetibilidade à corrosão sob tensão produzido pelo software *GRANTA Edupack*.

Analisando a Figura 17, vemos que, mesmo expostas em um meio corrosivo (cloreto), as ligas não são suscetíveis à corrosão sob tensão.

## 4.2. PROCESSABILIDADE

Outro parâmetro importante de comparação dessas ligas para a aplicação em chassis de veículos é a capacidade ou facilidade do material ser processado e conformado na peça final para aplicação. Por ser uma propriedade qualitativa, o *GRANTA* categoriza e classifica os materiais em quatro escalas:

1. Excelente: o material é frequentemente submetido a esse tipo de processamento e não apresenta problemas significativos;
2. Aceitável: o material geralmente é submetido a esse tipo de processamento, mas não está totalmente otimizado para isso;
3. Uso limitado: o material pode seguir esse processamento em casos limitados ou requer medidas especiais para evitar problemas;
4. Inadequado: o material não pode seguir este processamento.

Na Figura 18 é exibido a classificação das ligas candidatas em sua adequação aos processamentos de trabalho a frio, como laminação, extrusão e trefilação.

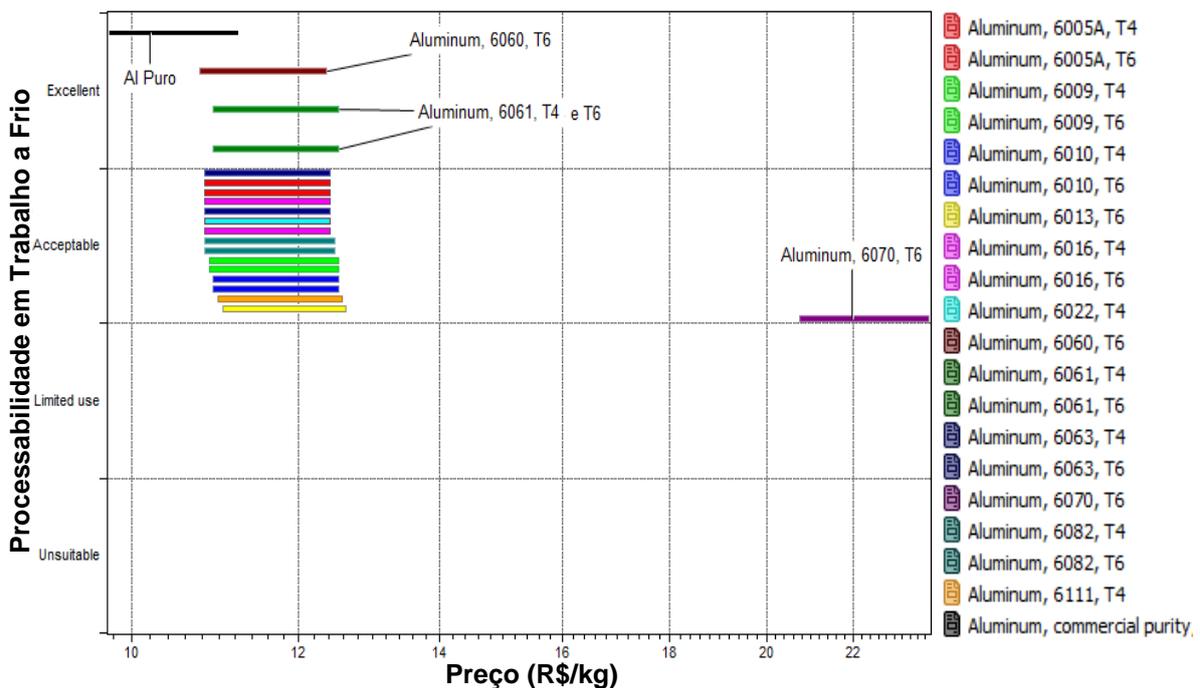


Figura 18: Classificação da capacidade das ligas da série 6xxx a passarem pelo processo de deformação a frio. Produzida a partir do software *GRANTA Edupack*.

As ligas 6060-T6, 6061-T4 e 6061-T6 são classificadas como excelentes ligas e tem esse tipo de processamento otimizado. As outras ligas candidatas são classificadas na escala “aceitável”, ou seja, podem ser muito bem processadas por esse tipo de processo, porém não é 100% otimizado. No trabalho a frio, um fator relevante para as ligas é sua capacidade de encruar e deformar, o que pode ter sido fator decisivo na classificação das ligas.

A seguir na Figura 19, temos a mesma classificação da Figura 18, porém, agora para a capacidade de processamento das ligas em trabalho a quente, como laminação a quente, extrusão a quente e forjamento.

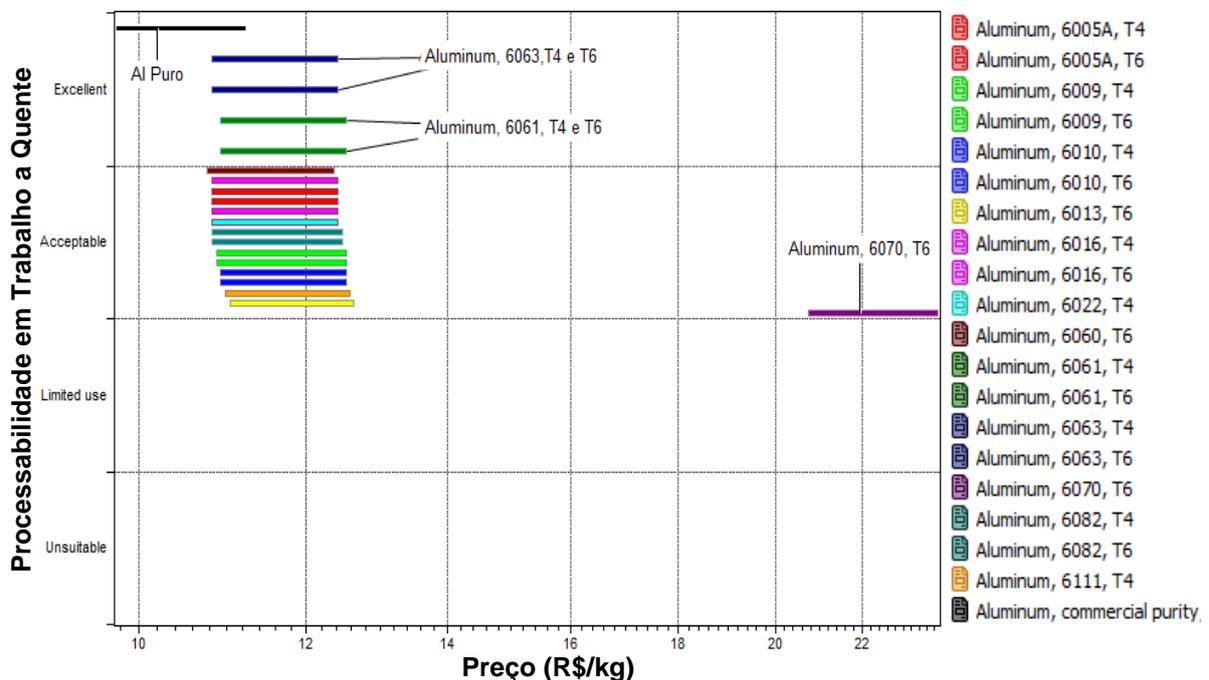


Figura 19: Classificação da capacidade de processamento por deformação a quente das ligas da série 6xxx. Produzida a partir do software *GRANTA Edupack*.

Dessa vez, as ligas que são classificadas com excelente processabilidade são as ligas 6063-T4, 6063-T6, 6061-T4 e 6061-T6. As demais ligas são classificadas com aceitável processabilidade para o trabalho à quente. Diferente do trabalho a frio, no trabalho a quente um parâmetro para comparação é a sensibilidade do material à taxa de deformação, indicando uma capacidade de endurecer conforme o material é deformado. Também é entendível o porquê da liga 6061 ser muito utilizada em aplicações cuja melhor rota de processamento é a extrusão, como exemplo em chassis de veículos e quadros de bicicletas [6].

Seguindo por esse caminho, a Figura 20 mostra essa classificação para as ligas candidatas em termos de processabilidade em processos de prensagem ou estampagem.

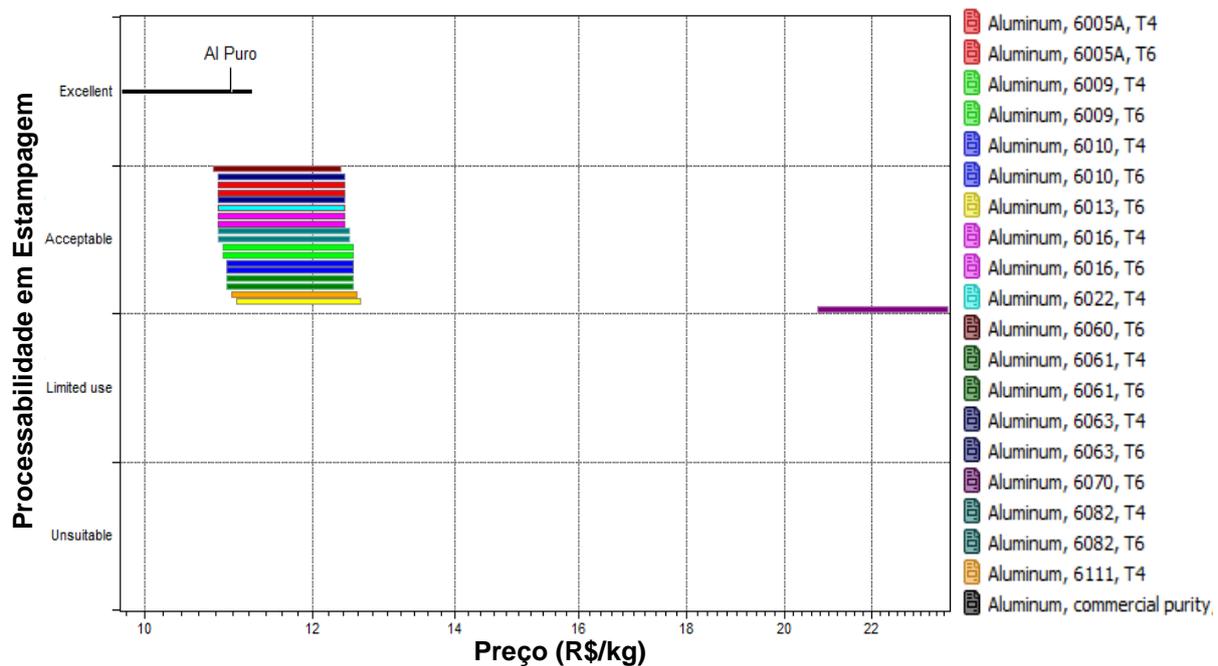


Figura 20: Classificação da capacidade de processamento por estampagem das ligas da série 6xxx. Produzida a partir do software *GRANTA Edupack*.

Para esse tipo de processo todas as ligas foram classificadas com processabilidade aceitável, somente o alumínio comercialmente puro como excelente. Dessa forma, as ligas são geralmente submetidas a esse tipo de processamento, apesar de o processamento não ser totalmente otimizado para elas.

Ademais, os gráficos das Figuras 18, 19 e 20 trazem o preço das ligas no eixo das ordenadas. A partir disso, é possível observar que todas as ligas apresentam uma faixa de preço bem parecida, de R\$ 10,80 a R\$ 12,80 por quilograma. Apenas a liga 6070 apresenta valores bem superiores, R\$ 20,70 a R\$ 24,00 por quilograma, praticamente o dobro do valor.

Como visto anteriormente no item 2.2.2. deste trabalho, várias peças são conformadas e posteriormente devem ser unidas para a produção do chassi [7]. Então, além de comparar parâmetros relacionados à conformação das peças, é relevante comparar a soldabilidade das ligas candidatas. De forma similar ao que foi feito com os aspectos de processabilidade, a soldabilidade, ou capacidade do material ser unido por soldagem, é categorizada em quatro escalas:

1. Excelente: o material pode ser facilmente soldado e a solda soldada pode atingir propriedades comparáveis ao material original;
2. Boa: o material pode ser soldado e a solda atinge propriedades aceitáveis. Pode ser necessário técnicas adicionais;
3. Pobre: o material pode ser soldado, porém a solda pode atingir propriedades indesejadas;
4. Inadequado: o material não pode ser soldado por métodos de soldagem convencionais.

Dessa forma, a Figura 21 apresenta o gráfico das ligas candidatas acerca de suas classificações de soldabilidade.

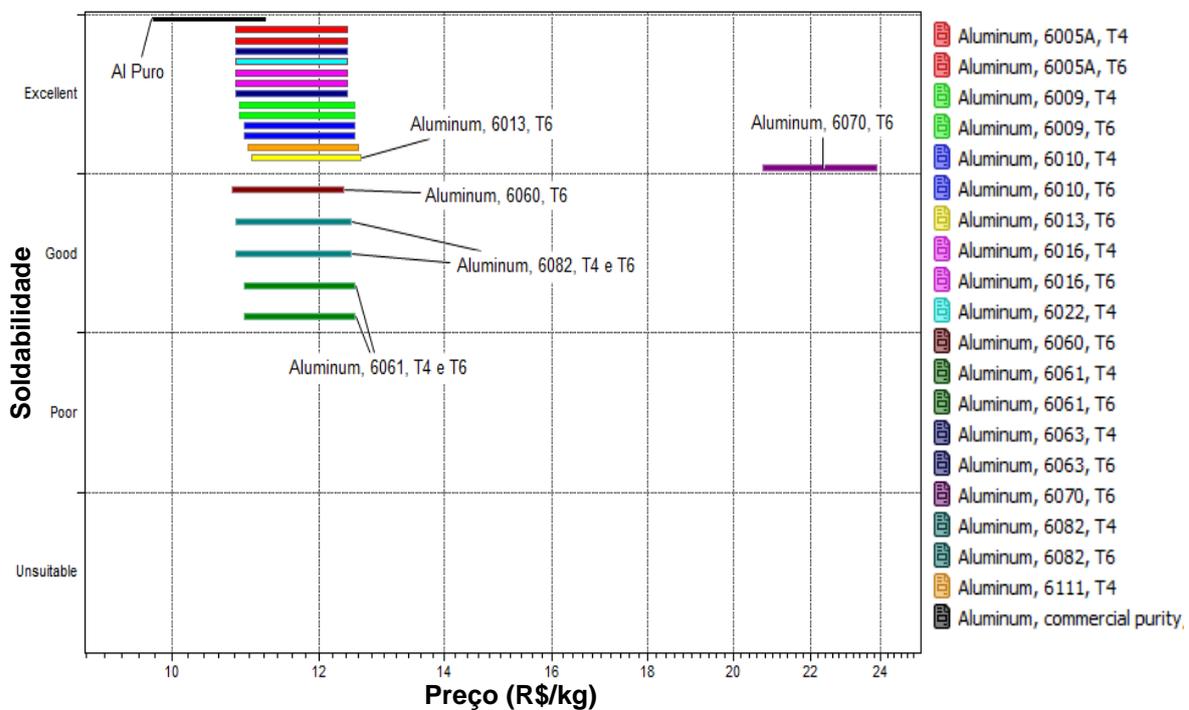


Figura 21: Classificação da capacidade de soldabilidade das ligas da série 6xxx. Produzida a partir do software *GRANTA Edupack*.

Nesse quesito, as ligas 6060-T6, 6082T4, 6082-T6, 6061-T4 e 6061-T6 apresentaram boa soldabilidade, enquanto as demais ligas apresentaram excelente soldabilidade.

### 4.3. IMPACTO AMBIENTAL

A comparação das ligas candidatas em termos do impacto ambiental foi feita através da ferramenta *Eco Audit* do software *GRANTA Edupack*. Para efetuar essa comparação foi utilizado o alumínio comercialmente puro como base para diferenciação do consumo energético e produção de dióxido carbônico de todas as ligas. Então, foi usado de parâmetro a produção e extrusão de 100 kg de cada uma das ligas, usando porcentagem típica de material reciclado na produção do material e reciclando a peça no fim da vida dos veículos. A seguir, na Figura 22, é mostrado um exemplo de como foram estabelecidos os parâmetros.

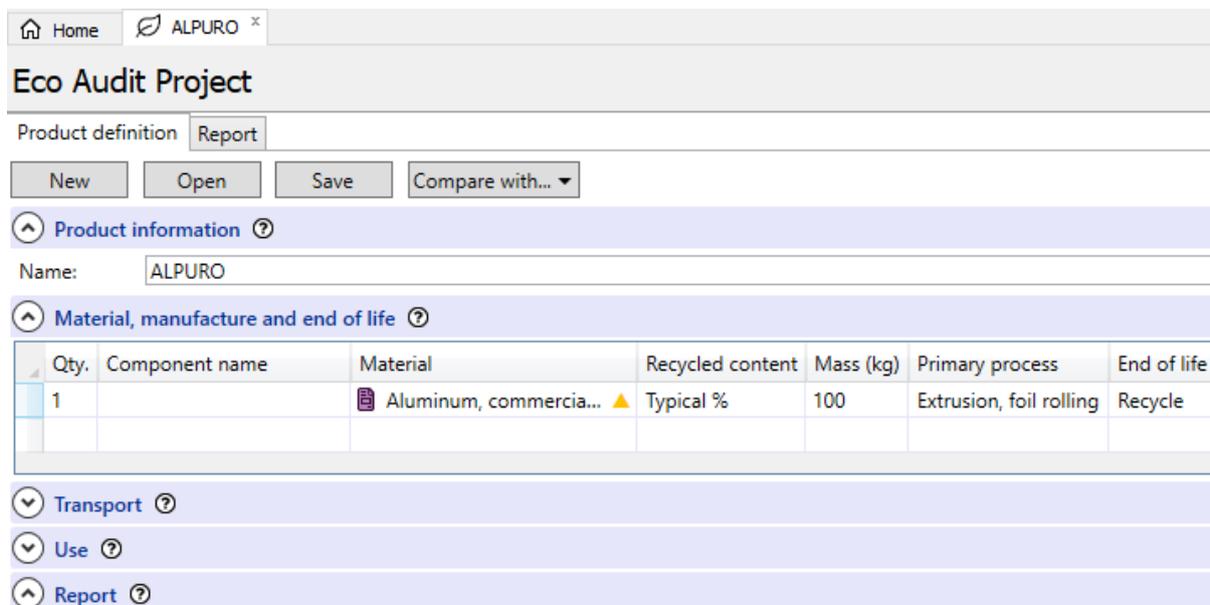
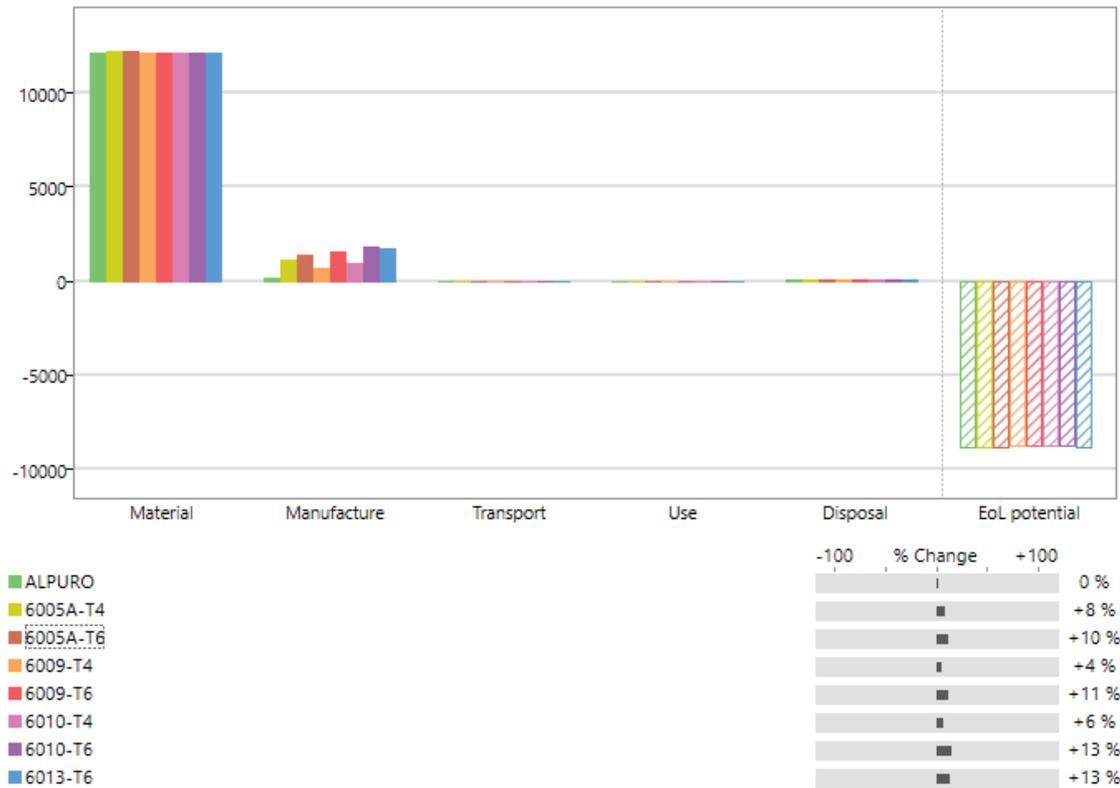


Figura 22: Demonstração de como foram estabelecidos os parâmetros para comparação das ligas da série 6xxx pela ferramenta *Eco Audit*.

Dessa forma, foram produzidas as Figuras 23, 24 e 25, as quais mostram dois gráficos cada, sendo que as Figuras 23a, 24a e 25a apresentam informações com respeito ao gasto energético, em MJ, e as Figuras 23b, 24b e 25b informações a respeito da quantidade de emissão do gás CO<sub>2</sub>, em kg.

### Gastos energéticos (MJ)



### Emissão de Gás CO<sub>2</sub> (kg)

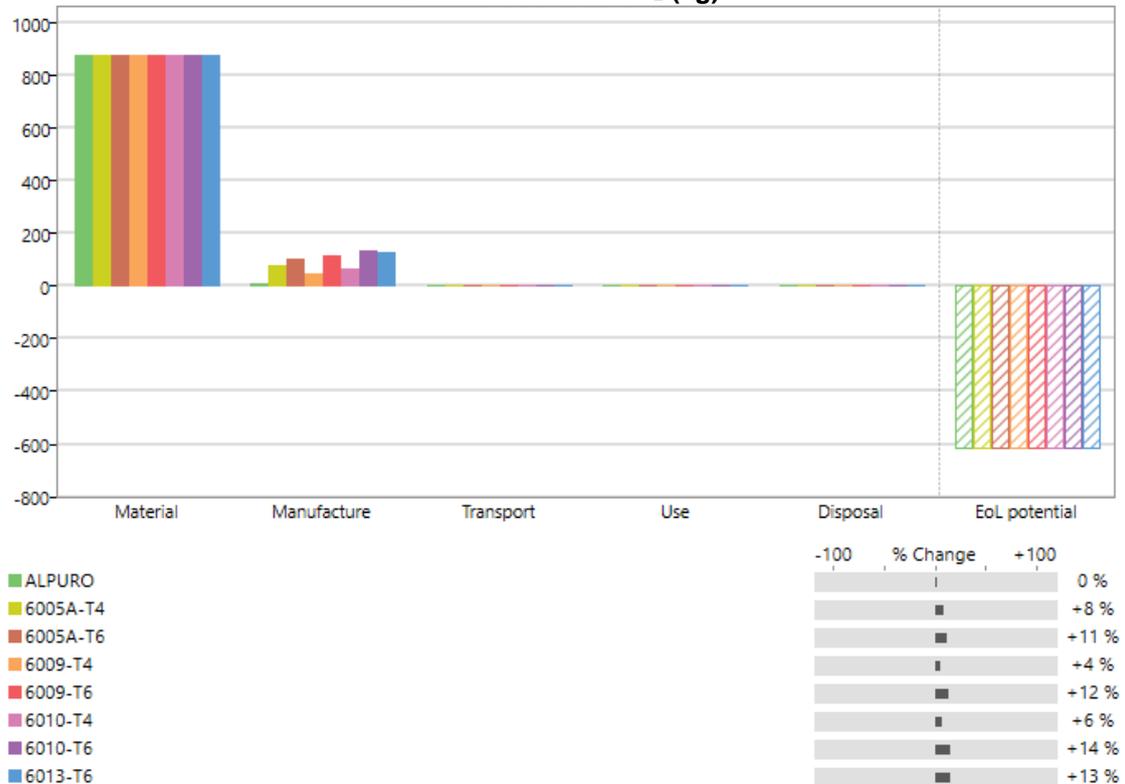


Figura 23: Gráficos de (a) gastos energéticos e (b) emissão de gás carbono na produção das ligas da série 6xxx em relação à produção de alumínio comercialmente puro gerados a partir da ferramenta *Eco Audit*.

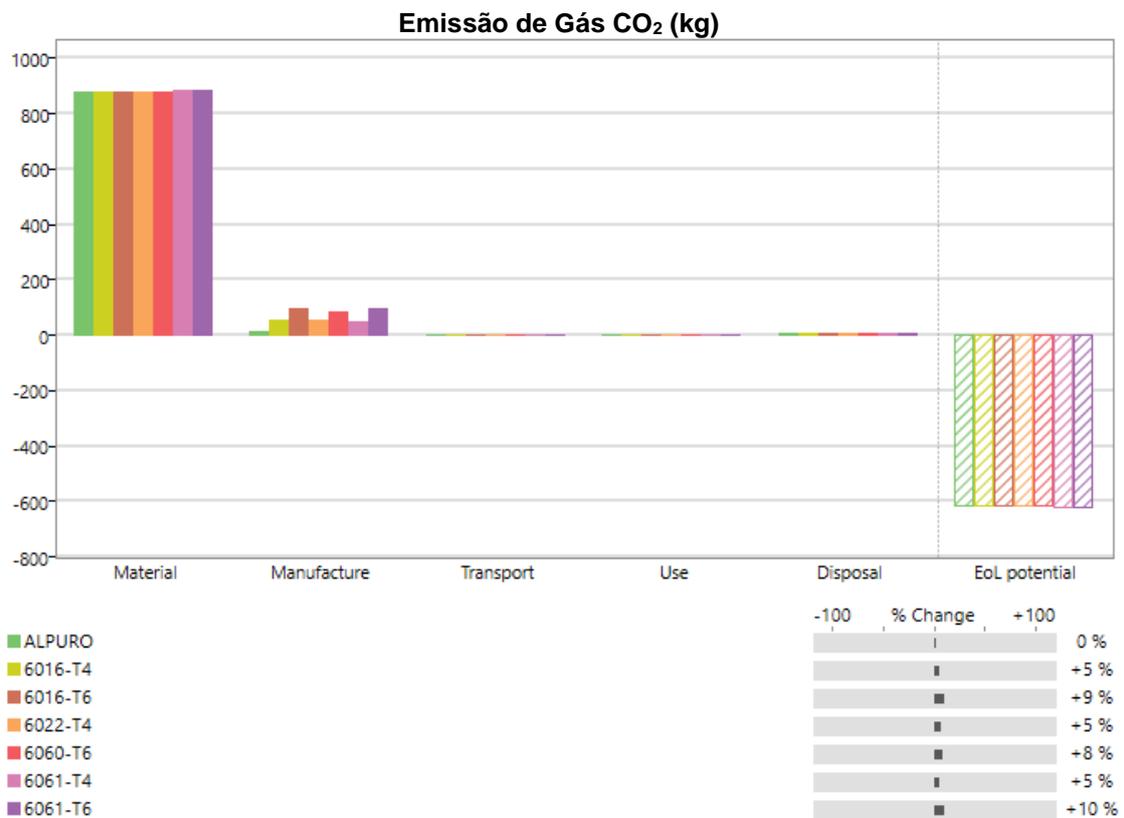
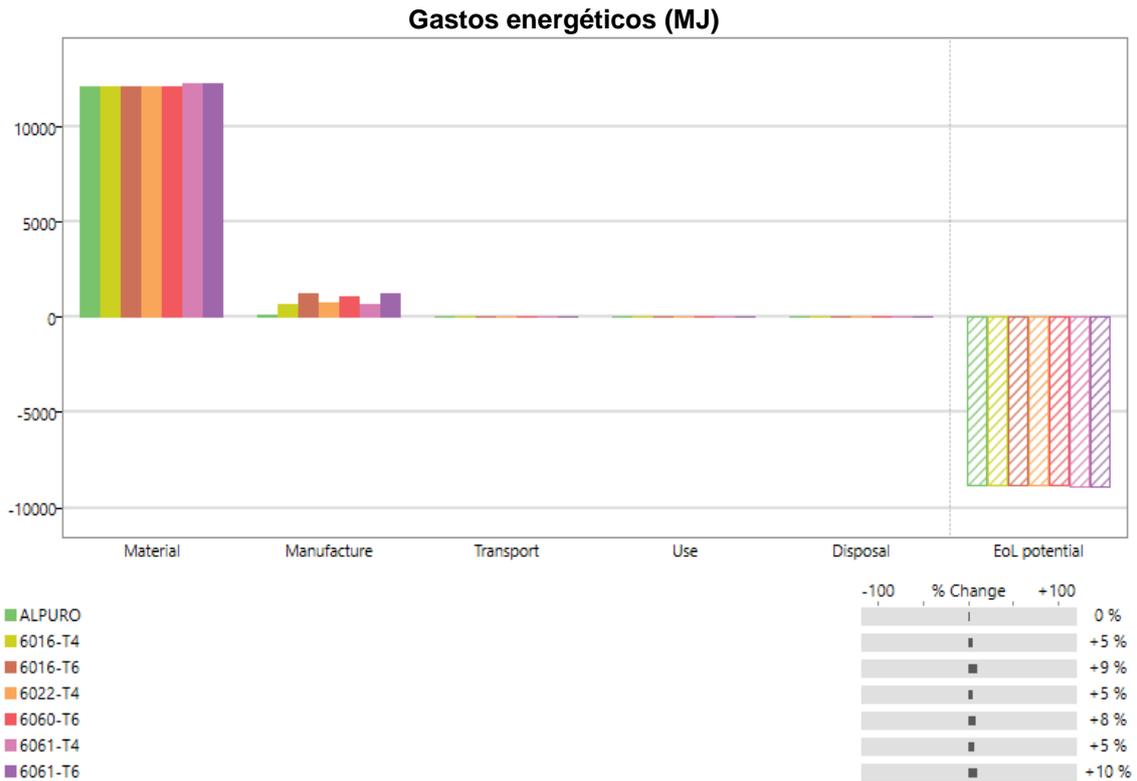


Figura 24: Gráficos de (a) gastos energéticos e (b) emissão de gás carbono na produção das ligas da série 6xxx em relação à produção de alumínio comercialmente puro gerados a partir da ferramenta *Eco Audit*.

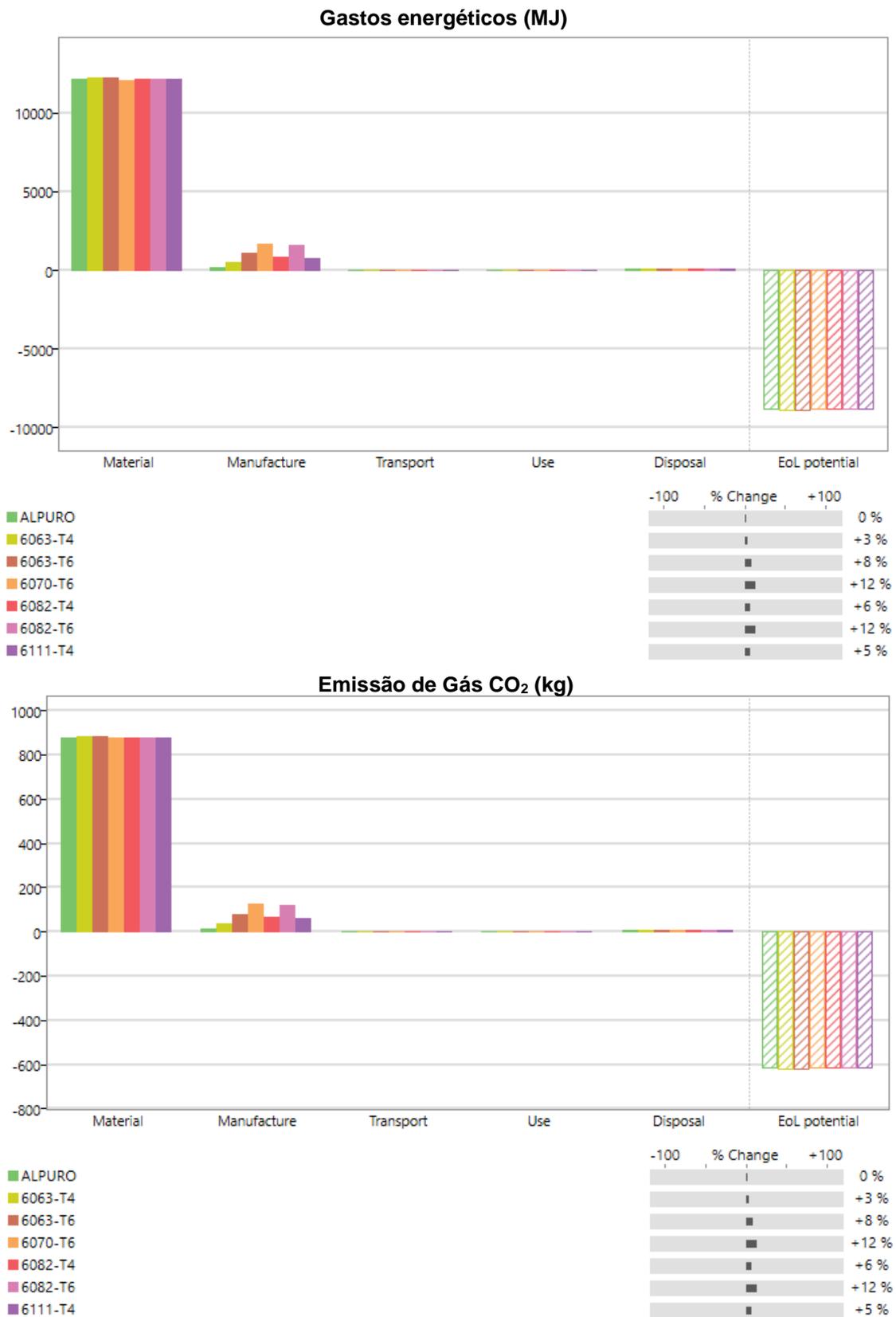


Figura 25: Gráficos de (a) gastos energéticos e (b) emissão de gás carbono na produção das ligas da série 6xxx em relação à produção de alumínio comercialmente puro gerados a partir da ferramenta *Eco Audit*.

A comparação acerca das ligas em seus respectivos impactos ambientais foi feita em relação ao alumínio comercialmente puro, onde o *GRANTA Edupack* reuni informações sobre o gasto energético (MJ) e emissão de gás CO<sub>2</sub> (kg) através de valores aproximados dos reais de indústrias e fabricas das quais o software faz suas consultas. E dessa forma, o software traz informações sobre a produção, manufatura, transporte, uso e descarte do material. Em caso de reciclagem, é trazido também a futura economia de energia devido a reciclagem daquele material.

Nos gráficos é visto que a maior diferenciação de energia gasta e dióxido de carbono emitido é na manufatura. Isso porque as ligas na condição de tratamento térmico T6 passam pelo envelhecimento artificial, tratamento que exige um gasto maior de energia. Nesse tratamento térmico, as ligas são solubilizadas e posteriormente aquecidas entre 100 e 200 °C para que os átomos se difundam e haja a precipitação de fases endurecedores, melhorando as propriedades mecânicas da liga [7-8]. Dessa forma, essa necessidade de aquecimento prolongado das peças gera um gasto energético superior àquele associado à produção das ligas na condição T4, as quais sofreram apenas tratamento de solubilização e o envelhecimento é feito em temperatura ambiente (naturalmente).

Dessa maneira, a liga que teve maior gasto energético e emissão de gás CO<sub>2</sub> foi a liga 6010-T6, utilizando 13% a mais de energia que a produção de Al comercialmente puro e emitindo 13% mais dióxido de carbono no meio ambiente. E a liga que teve resultados menos impactantes ao meio ambiente foi a liga 6063-T4, com gasto energético e emissão de dióxido de carbono somente 3% superior ao Al comercialmente puro.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com a grande quantidade de informações de propriedades obtida no item anterior, tocando vertentes relacionadas a desempenho, processabilidade e impacto ambiental das ligas, são necessárias maneiras para tratar e comparar essa quantidade de informações a fim de se obter uma classificação dentre todas as possibilidades retratadas.

Dessa forma, o método escolhido para comparação e classificação das ligas foi o método *TOPSIS* (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Esse método é uma técnica de avaliação dos dados de propriedades dos materiais em relação a um resultado ideal e um resultado não-ideal.

A fim de quantificar propriedades qualitativas, como processabilidade e soldabilidade, foram dadas notas de acordo com os 4 níveis de classificação em que essas propriedades eram categorizadas pelo software *GRANTA Edupack*. Dessa forma, a Tabela 4 exibe como foram atribuídas essas notas.

Tabela 4: Determinação das notas para as propriedades qualitativas das ligas da série 6xxx.

<b>Nota</b>	<b>Categoria</b>
<b>1</b>	Indesejável
<b>2</b>	Pobre
<b>3</b>	Bom
<b>4</b>	Excelente

Diante disso, a Tabela 5 mostra as médias das propriedades das ligas candidatas, apenas excluindo as propriedades de corrosão, já que todas as ligas exibiram resultados idênticos. Além disso, serão tomados três cenários para comparação, um visando o melhor desempenho, outro visando melhor processabilidade e um último visando menor impacto ambiental.

Ligas	$IM_1 - \frac{1}{\rho} E^{\frac{1}{3}}$	$IM_2 - \frac{1}{\rho} \sigma_y^2$	Tenacidade (kJ/m <sup>2</sup> )	Resistência a Fadiga a 10 <sup>7</sup> ciclos (MPa)	Processabilidade	Soldabilidade	Gasto de energia (%)	Emissão de CO <sub>2</sub> (%)	Custo (R\$/kg)
6005A-T4	1,52	3,88	15,8	88,7	3	4	8	8	11,6
6005A-T6	1,52	5,76	15,8	105,7	3	4	10	11	11,6
6009-T4	1,51	4,14	15,9	107	3	4	4	3	11,7
6009-T6	1,51	6,50	15,9	115	3	4	11	12	11,7
6010-T4	1,52	4,93	15,9	117	3	4	6	6	11,7
6010-T6	1,52	7,05	15,9	175,5	3	4	13	14	11,7
6013-T6	1,51	6,91	16,1	137,5	3	4	13	13	11,9
6016-T4	1,52	3,11	15,8	61,1	3	4	5	5	11,6
6016-T6	1,52	5,38	15,8	102,9	3	4	9	9	11,6
6022-T4	1,52	4,43	15,9	125,5	3	4	5	5	11,6
6060-T6	1,53	4,70	15,4	74,1	4	3	8	8	11,6
6061-T4	1,51	4,17	16,1	98,6	4	3	5	5	11,7
6061-T6	1,51	5,95	16,1	121,5	4	3	10	10	11,7
6063-T4	1,52	3,23	15,9	62,3	3	4	3	3	11,6
6063-T6	1,54	5,45	15,4	82,9	3	4	8	6	11,6
6070-T6	1,52	6,79	15,9	95,5	3	4	12	12	22,3
6082-T4	1,54	4,13	15,3	89,6	3	3	6	6	11,6
6082-T6	1,54	5,97	15,3	115	3	3	12	12	11,6
6111-T4	1,51	4,59	15,9	149	3	4	5	5	11,8

Tabela 5: Médias dos valores de propriedades das ligas da série 6xxx obtidas pelo *GRANTA Edupack*.

## 5.1. CENÁRIO DE MELHOR DESEMPENHO

Para o cenário de desempenho, a ponderação dos critérios foi tomada como exibido na Figura 26.

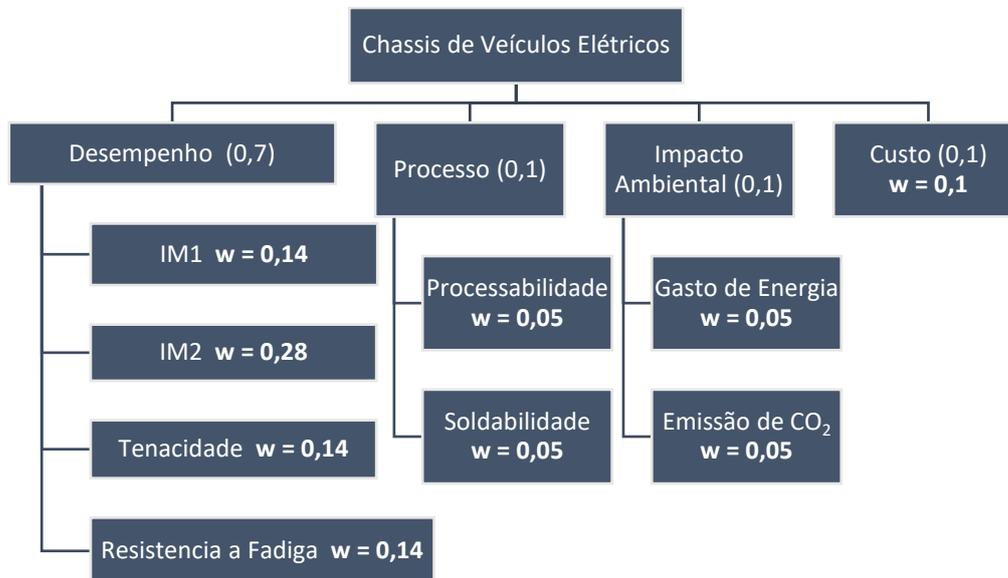


Figura 26: Ponderação dos critérios de seleção das melhores ligas para o cenário de melhor desempenho.

A ponderação para o desempenho foi feita dando maior peso para o índice de mérito relacionado ao limite elástico. Isso porque observando a Tabela 5, os índices de mérito relativos à rigidez e à tenacidade são parâmetros com variação mínima entre as ligas, o que acaba sendo uma análise de menor importância. Além disso, a resistência à fadiga foi considerada sendo uma propriedade de menor importância em relação ao limite de escoamento.

A partir dessa ponderação, foi feita a classificação das ligas a partir de suas propriedades pelo método *TOPSIS*. Todo processo de tratamento de dados e construção da tabela de classificação foi feito seguindo a análise feita no estudo de caso de DONG-HYUN JEE et al. [27].

Com isso, foi construída a Figura 27, onde consta a classificação das ligas candidatas para o cenário de desempenho.

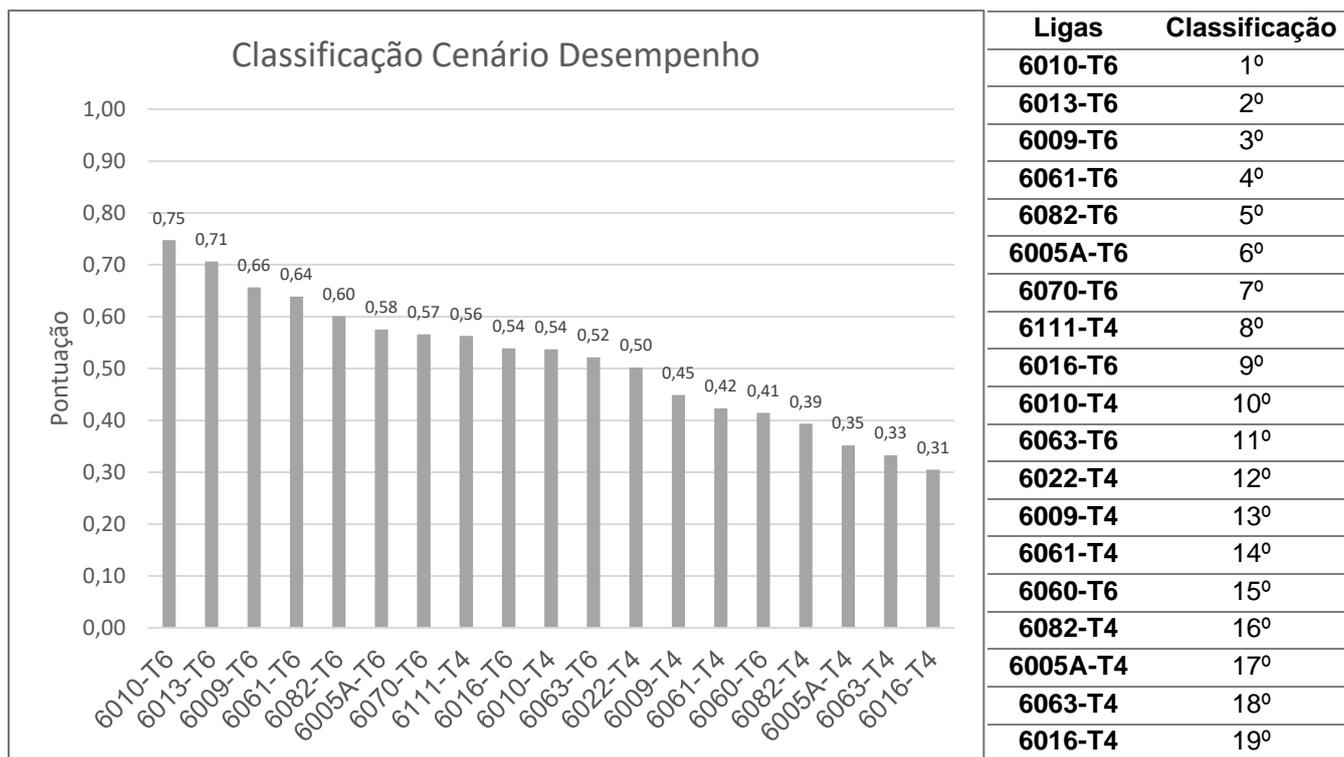


Figura 27: Classificação das ligas para o cenário de melhor desempenho.

Assim, a liga 6010-T6 foi a mais bem classificada no cenário desempenho provavelmente devido a seu alto valor de elementos de liga endurecedores, sendo, então, a liga de melhores propriedades mecânicas. Como já era esperado, as ligas na condição T6 dominaram o topo da classificação nesse cenário devido ao tratamento térmico de envelhecimento artificial. A liga na condição T4 melhor classificada foi a 6111-T4, ocupando a oitava colocação. E a pior liga nesse cenário foi a 6016-T4.

## 5.2. CENÁRIO DE MELHOR PROCESSABILIDADE

Para o cenário de processabilidade, a ponderação dos critérios foi tomada como exibido na Figura 28. A ponderação para a processabilidade foi feita dando maior peso para os critérios de capacidade das ligas de passarem por deformação a quente e soldabilidade. Como são critérios qualitativos, foi utilizado a Tabela 4 para dar notas e transformar a classificação das ligas em valores numéricos. A partir dessa ponderação, foi feito a classificação das ligas a partir de suas propriedades pelo método *TOPSIS*. Todo processo de tratamento de dados e construção da tabela de

classificação foi feito seguindo a análise feita no estudo de caso de DONG-HYUN JEE et al. [27].

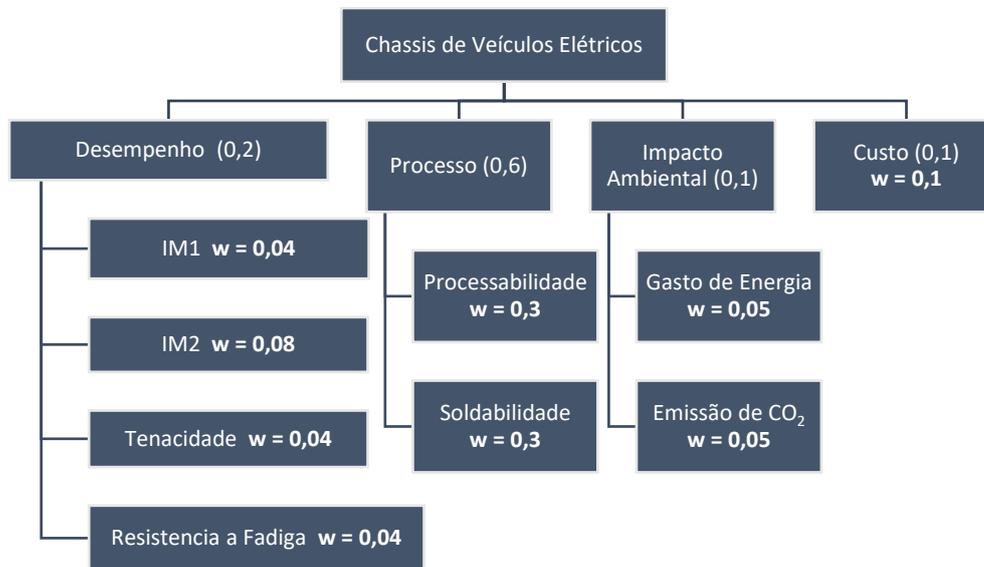


Figura 28: Ponderação dos critérios de seleção das melhores ligas para o cenário de melhor processabilidade.

Com isso, foi construída a Figura 29, onde está a classificação das ligas candidatas para o cenário de processabilidade.

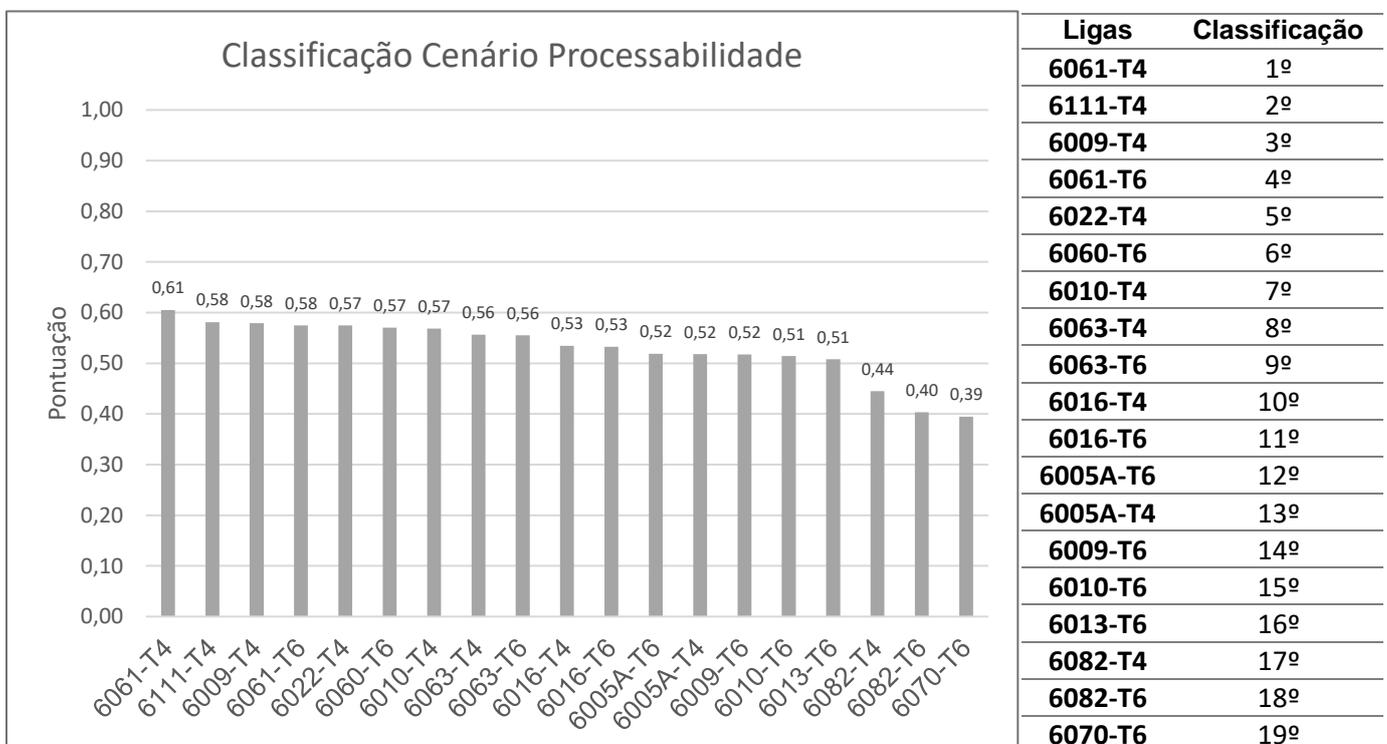


Figura 29: Classificação das ligas para o cenário de melhor processabilidade.

A liga mais bem classificada no cenário de processabilidade foi a 6061-T4, como já previsto anteriormente. A liga 6111-T4 foi a segunda mais bem classificada. A com pior colocação foi a liga 6070-T6. A diferença de pontuação dentre as ligas é menor nesse cenário em relação ao cenário de desempenho. Somente as três últimas ligas, 6082-T4, 6082-T6 e 6070-T6, apresentaram uma pontuação um pouco mais distante das primeiras ligas.

### 5.3. CENÁRIO DE MENOR IMPACTO AMBIENTAL

Para o cenário de impacto ambiental, a ponderação dos critérios foi tomada como exibido na Figura 30.

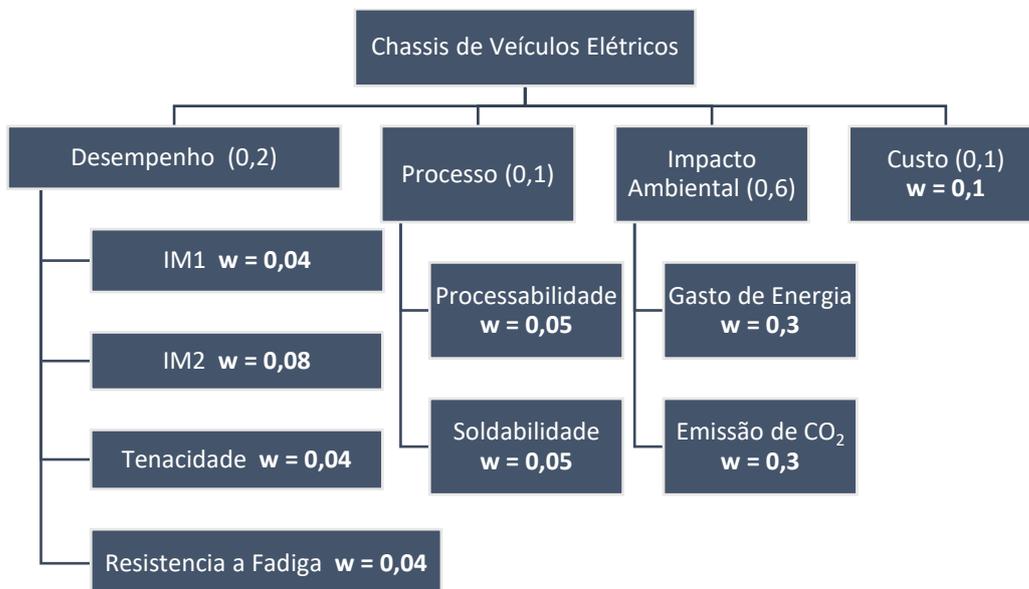


Figura 30: Ponderação dos critérios de seleção das melhores ligas para o cenário de menor impacto ambiental.

A ponderação para esse cenário foi elaborada dando maiores pesos para os critérios de gasto de energia e emissão de CO<sub>2</sub>, visando, assim, selecionar as ligas menos prejudiciais ao planeta.

Da mesma forma, foi utilizado o método *TOPSIS* para classificação das ligas seguindo essa ponderação proposta nesse cenário. Todo processo de tratamento de dados e construção da tabela de classificação foi feito seguindo a análise feita no estudo de caso de DONG-HYUN JEE et al [27].

A partir disso, foi construída a Figura 31, onde está a classificação das ligas candidatas para o cenário de impacto ambiental.

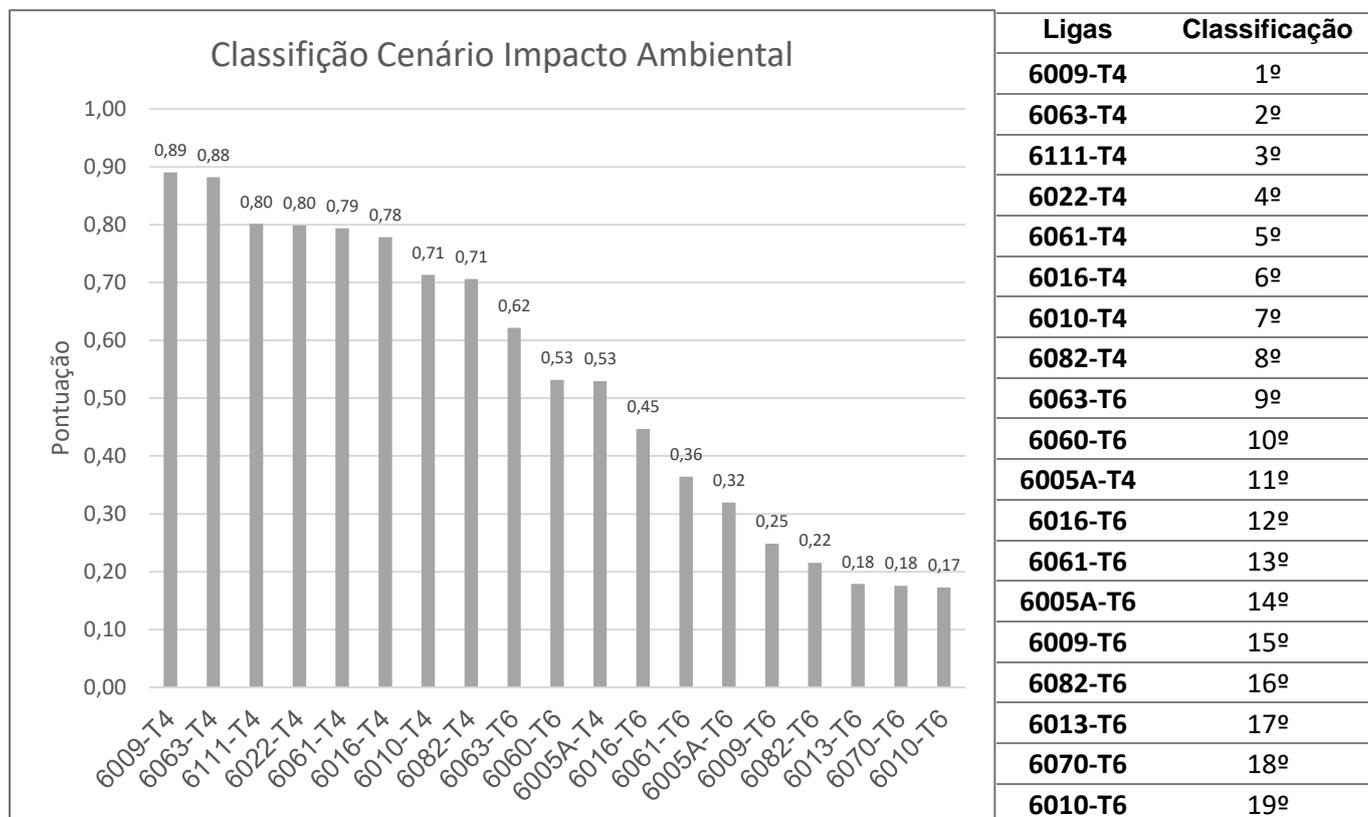


Figura 31: Classificação das ligas para o cenário de menor impacto ambiental.

Para esse cenário, a variação de pontuação acabou sendo maior do que os dois primeiros cenários. Isso indicou que, apesar de serem ligas da mesma série e composições próximas, a produção das ligas e a escolha de processamento acaba refletindo bastante no impacto ambiental de produção. As ligas da condição T4 mostraram-se mais bem classificadas do que as ligas da condição T6. Isso devido ao maior gasto de energia no tratamento térmico de envelhecimento artificial das ligas na condição T6. Com isso, a liga melhor classificada foi a 6009-T4 seguida de perto pela 6063-T4. A liga 6111-T4, que foi a melhor liga da condição T4 no quesito desempenho foi a terceira colocada para esse cenário. As piores ligas foram as 6070-T6 e 6010-T6, primeira colocada no quesito desempenho.

## 6. CONCLUSÕES

A partir da comparação entre as várias ligas selecionadas, em três cenários diferentes, o de melhor desempenho, melhor processabilidade e menor impacto ambiental, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

Na comparação dentro do cenário de melhor desempenho, as ligas da condição T6 foram as que apresentaram melhores pontuações, sendo a liga 6010-T6 a liga mais bem classificada, seguida das ligas 6013-T6, 6009-T6 e 6061-T6. A liga 6111-T4 foi a com melhor classificação dentre as ligas da condição T4, ocupando a oitava colocação no geral e ficando na frente de ligas 6016-T6 e 6063-T6 que são ligas na condição T6 de tratamento térmico.

No cenário de processamento é observado que a variação de pontuação dentre as ligas não é grande, sendo a 6061-T4 a primeira colocada, seguida das ligas 6111-T4 e 6009-T4. As piores colocadas e com maior distanciamento das primeiras foram as ligas 6082-T4, 6082-T6 e 6070-T6.

Por último, no cenário de menor impacto ambiental é perceptível que as ligas na condição T4 são as que produzem menor impacto ambiental em relação às ligas da condição T6. Isso é reflexo do tratamento térmico de envelhecimento artificial, que gera um gasto de energia e emissão de gás CO<sub>2</sub> maior devido a necessidade de aquecimento das ligas por longos períodos. Diante disso, a liga 6009-T4 foi a primeira colocada seguida das ligas 6063-T4, 6111-T4 e 6022-T4. As piores ligas no quesito ambiental foram as 6010-T6, 6070-T6 e 6013-T6.

Com isso, foi possível indicar as melhores ligas em cada cenário. No entanto, com uma visão mais geral é possível observar que a liga 6111-T4 obteve boas classificações nos três cenários. Apesar de não liderar nenhum, foi a segunda melhor liga do cenário de processabilidade e a melhor liga no cenário de melhor desempenho dentro do conjunto de ligas na condição T4. Além disso, no cenário mais relevante para os veículos elétricos, o de menor impacto ambiental, ela ficou na terceira colocação com pontuação bem próxima das primeiras colocadas. Dessa forma, conclui-se que a liga 6111-T4 teve a melhor combinação de características e propriedades para a aplicação em chassis de veículos elétricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INDÚSTRIA 4.0: Entenda seus conceitos e fundamentos. **Portal da Indústria**, c2022. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>>. Acesso em: 28 de fev. de 2022.
- [2] A Indústria 4.0 está transformando o Setor Automobilístico. **Carro elétrico**, 2020. Disponível em: <<https://carroeletrico.com.br/blog/industria-4-0/>>. Acesso em: 28 de fev. de 2022.
- [3] HOFFMANN, Felipe. Motores elétricos e desafios para obter melhores potenciais. **FHC Performance**, 2021. Disponível em: <<https://www.fhcbperformance.com.br/motores-eletricos-os-desafios-para-obter-altas-potencias/>>. Acesso em: 28 de fev. de 2022.
- [4] LOZEKANN, Luciano et al. Os Desafios da Difusão de Veículos Elétricos no Brasil. **Cenários Solar**, 2021. Disponível em: <<https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/os-desafios-da-difusao-de-veiculos-eletricos-no-brasil/>>. Acesso em: 2 de março de 2022.
- [5] LUQUE, Pablo et al. Multi-objective evolutionary design of an electric vehicle chassis. **Sensors**, v. 20, n. 13, p. 3633, 2020.
- [6] MALLICK, Pankaj K. (Ed.). **Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles**. Woodhead publishing, 2020.
- [7] MILLER, W. S. et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. **Materials Science and Engineering: A**, v. 280, n. 1, p. 37-49, 2000.
- [8] CHANDLA, Nagender Kumar; KANT, Suman; GOUD, M. M. Mechanical, tribological and microstructural characterization of stir cast Al-6061 metal/matrix composites—a comprehensive review. **Sādhanā**, v. 46, n. 1, p. 1-38, 2021.
- [9] SOKOLOWSKI, John A.; BANKS, Catherine M. (Ed.). **Principles of modeling and simulation: a multidisciplinary approach**. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] BALADEZ, Fabio. O passado, o presente e o futuro dos simuladores. **FaSci-Tech**, v. 1, n. 1, 2016.
- [11] DE SOUZA, Flávio Marcos; BACHEGA, Stella Jacyszyn. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: UM ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA AUTOMOBILÍSTICA. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 1, 2012.
- [12] CARVALHO, Naim Jessé dos Santos et al. Importância da modelagem computacional na engenharia. **Jornada Acadêmica UFOPA**, 2020.
- [13] MAGMASOFT autonomous engineering. **MAGMASOFT**, c2021. Disponível em: <<https://www.magmasoft.com.br/pt/solucoes/magmasoft/>>. Acesso em: 21 de fev. de 2022.
- [14] ABOUT Thermo-Calc Software. **ThermoCalc**, c2022. Disponível em: <<https://thermocalc.com/>>. Acesso em: 22 de fev. de 2022.
- [15] SUPPORT for materials education. **Ansys**, c2022. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.
- [16] MORITA, Akiyoshi. Aluminum alloys for automobile applications. **Proc. 6th ICAA**, v. 1, p. 25-32, 1998.
- [17] SEARS, K. Automotive Engineering: Strategic Overview. 2 (1): 55–68 Sumeet Wadibhasme, Amit Ladekar and Roshan Paunikar Hub Centre Steering. **Discovery**, v. 24, n. 82, p. 29-32, 1997.
- [18] COLE, G. S.; SHERMAN, A. M. Light weight materials for automotive applications. **Materials characterization**, v. 35, n. 1, p. 3-9, 1995.
- [19] WANG, Zhixiu et al. Improving the strength and ductility of Al–Mg–Si–Cu alloys by a novel thermo-mechanical treatment. **Materials Science and Engineering: A**, v. 607, p. 313-317, 2014.

- [20] DONG, Xixi et al. High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 773, p. 86-96, 2019.
- [21] SCOTT, Colin E. Aluminium sheet for autobody construction-The need for weight saving. **Matériaux & Techniques**, v. 83, n. 10-11, p. 21-27, 1995.
- [22] PASSOS, Eduardo. Com nova plataforma de elétricos da Hyundai um carro pode carregar o outro. **Quatro Rodas**, 2020. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/plataforma-carro-eletrico-hyundai-kia/>>. Acesso em: 4 de março de 2022.
- [23] ASHBY, Michael F.; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. **Materials: engineering, science, processing and design**. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [24] PRAKASH, YM Shiva et al. Property enhancement during artificial aging of Al6061-Silicon Oxide metal matrix composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 11, p. 24186-24193, 2018.
- [25] LEE, S. H. et al. Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding. **Materials Science and Engineering: A**, v. 325, n. 1-2, p. 228-235, 2002.
- [26] WANG, Tianlun et al. Effect of Mg on microstructure and properties of 6000 series high strength and high ductility aluminum alloy. **Materials Research Express**, v. 6, n. 8, p. 0865a7, 2019.
- [27] JEE, Dong-Hyun; KANG, Ki-Ju. A method for optimal material selection aided with decision making theory. **Materials & design**, v. 21, n. 3, p. 199-206, 2000.
- [28] REBOUL, M. C.; BAROUX, B. Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys. **Materials and Corrosion**, v. 62, n. 3, p. 215-233, 2011.