

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

Willian de Almeida Lamarque

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS
LIGAS DE ALUMÍNIO 3104-H34 E 5052-H32**

Santa Maria, RS
2023

Willian de Almeida Lamarque

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LIGAS DE
ALUMÍNIO 3104-H34 E 5052-H32**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Aeroespacial**.

Orientador: Prof. Cristiano José Scheuer

Santa Maria, RS
2023

Espaço destinado à ficha catalográfica

Willian de Almeida Lamarque

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LIGAS DE
ALUMÍNIO 3104-H34 E 5052-H32**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Aeroespacial**.

Aprovado em 18 de dezembro de 2023:

Cristiano José Scheuer, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

César Gabriel Santos, Dr. Eng. (UFSM)

Luís Fernando Nicolini, Dr. Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

DEDICATÓRIA

À minha família e amigos que foram fundamentais durante toda essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal de Santa Maria por proporcionar um ambiente propício ao aprendizado que vai além das salas de aula.

Aos professores do curso de engenharia aeroespacial, em especial aos membros do departamento da engenharia mecânica, minha gratidão. O conhecimento transmitido e as palavras, por vezes incisivas, desempenharam um papel fundamental na minha formação tanto como profissional quanto como indivíduo.

Ao laboratório de apoio ao desenvolvimento e a inovação de produtos e processos (LADIPP), especialmente à Juliana da Silva, obrigado pelo suporte e pela ajuda constante para garantir que os testes fossem conduzidos de maneira correta.

Aos meus amigos João Cipriani, Pedro Vianna, Manoel de Oliveira e Augusto Pozzebon que estiveram sempre ao meu lado, me incentivando em toda a jornada da graduação e oferecendo suporte sempre que fosse necessário.

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO 3104-H34 E 5052-H32

AUTOR: Willian de Almeida Lamarque
Orientador: Cristiano José Scheuer

Os testes de cisalhamento são extensivamente empregados na caracterização do comportamento de chapas metálicas submetidas a processos de conformação. Essa caracterização busca, principalmente, estabelecer condições de processamento que possibilitem grandes deformações sem induzir instabilidade plástica. Neste estudo, é conduzida uma análise comparativa do comportamento em cisalhamento sob tração das ligas de alumínio 5052-H32 e 3104-H34, considerando o efeito da anisotropia gerada pela laminação prévia das chapas. Essas ligas, que possuem resistência mecânica similar, porém composições químicas distintas, são submetidas a processos de produção por conformação mecânica realizados sob condições semelhantes. Para realizar essa caracterização, este estudo adotou o método de teste de cisalhamento sob tração proposto por Miyauchi, baseado nas diretrizes da norma ASTM B831-05. Para complementar os resultados dos testes de cisalhamento, ambos os materiais foram submetidas à análise microestrutural por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X. Os resultados da análise microestrutural revelam que a liga 5052-H32 é composta por partículas de intermetálicos Al_3Fe e Al_3Mg_2 , ao passo que a liga 3104-H34 apresenta precipitados de $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ e $Al_6(Fe,Mn)$. Em ambos os casos, esses elementos estão dispersos de maneira aleatória dentro de uma matriz de alumínio (α -Al). Com base nos resultados da caracterização do comportamento ao cisalhamento sob tração, observa-se que a liga 5052-H32 tende a escoar sob uma menor tensão de escoamento quando submetida ao cisalhamento sendo tracionada na direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação, apresentando maior deformação antes da fratura nas direções de 45° e 60° . A ruptura por cisalhamento dessa liga ocorrerá sob valores de tensão limite de cisalhamento semelhantes em todas as direções de carregamento. Já a liga 3104-H34 escoar e fratura, nas condições de carregamento por cisalhamento em tração, mantendo valores idênticos de tensão de escoamento e tensão limite de cisalhamento independentemente da direção de deformação. No entanto, a deformação prévia à fratura será maior quando submetida à direção de 45° em relação ao sentido de laminação.

Palavras-chave: Ligas de Alumínio, Resistência ao Cisalhamento, Ecoeficiência, Reciclabilidade

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SHEARING STRENGTH OF 3104-H34 AND 5052-H32 ALUMINUM ALLOYS

AUTHOR: Willian de Almeida Lamarque
ADVISOR: Cristiano José Scheuer

The shear tests are extensively employed to characterize the behavior of metal sheets subjected to forming processes. This characterization aims primarily to establish processing conditions that allow for significant deformations without inducing plastic instability. In this study, a comparative analysis of the shear behavior under tension of the 5052-H32 and 3104-H34 aluminum alloys is conducted, considering the effect of anisotropy generated by prior sheet rolling. These alloys, which have similar mechanical strength but distinct chemical compositions, undergo production processes through mechanical forming under similar conditions. To perform this characterization, this study adopted the shear test method under tension proposed by Miyauchi, based on ASTM guidelines. To complement the shear test results, both materials underwent microstructural analysis using scanning electron microscopy and X-ray diffraction techniques. The microstructural analysis results reveal that the 5052-H32 alloy consists of Al_3Fe and Al_3Mg_2 intermetallic particles, while the 3104-H34 alloy shows precipitates of $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ and $Al_6(Fe,Mn)$. In both cases, these elements are randomly dispersed within an aluminum matrix (α -Al). Based on the characterization results of the shear behavior under tension, it is observed that the 5052-H32 alloy tends to yield at a lower yield stress when subjected to shear while being pulled in the 45° direction relative to its rolling direction, exhibiting greater deformation before fracture in the 45° and 60° directions. The shear fracture of this alloy will occur under similar shear stress limit values in all loading directions. On the other hand, the 3104-H34 alloy yields and fractures under shear loading conditions in tension, maintaining identical yield stress and shear stress limit regardless of the deformation direction. However, the pre-fracture deformation will be greater when subjected to the 45° direction relative to the rolling direction.

Keywords: Aluminum Alloys, Shear Strength, Ecoefficiency, Recyclability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Adição de elementos químicos ao alumínio e suas respectivas ligas e características.	18
FIGURA 2 – Evolução do uso de ligas de alumínio em veículos automotores ao longo do tempo.	27
FIGURA 3 – Emprego de Alumínio na Ford F-150.	28
FIGURA 4 – Distribuição percentual dos principais setores consumidores de alumínio no Brasil em 2021.	28
FIGURA 5 – As fases do ciclo de vida dos materiais.	33
FIGURA 6 – Estimativas aproximadas para a emissão de resíduos em cada etapa do ciclo de vida de um automóvel.	34
FIGURA 7 – Configuração e medidas dos corpos de prova (a) empregados neste estudo e (b) obtidos a partir das normas estabelecidas pela ASTM B831–05. (c) Posicionamento dos corpos de prova em relação à direção de laminação das chapas de alumínio.	38
FIGURA 8 – Máquina de ensaio universal EMIC DL2000	39
FIGURA 9 – Microestrutura na superfície das chapas das ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34.	42
FIGURA 10 – Padrões de difração de raios-X obtidos da superfície das chapas das ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34.	44
FIGURA 11 – Gráficos demonstrativos das curvas de tensão-deformação em cisalhamento para as amostras usinadas em ângulos de (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° e (e) 90° em relação à orientação de laminação da liga 5052-H32. A figura (f) mostra um comparativo entre as curvas para cada ângulo. ...	45
FIGURA 12 – Gráficos demonstrativos das curvas de tensão-deformação em cisalhamento para as amostras usinadas em ângulos de (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° e (e) 90° em relação à orientação de laminação da liga 3104-H34. A figura (f) mostra um comparativo entre as curvas para cada ângulo. ...	46
FIGURA 13 – Compilação dos valores da tensão de escoamento por cisalhamento (τ_e), da tensão limite de cisalhamento (τ_c), da deformação plástica por cisalhamento (γ) e da microdureza Vickers (H), em relação à orientação de laminação das ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34.	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação das ligas de alumínio forjadas e suas principais aplicações.	19
TABELA 2 – Designação dos tratamentos para ligas de alumínio.	20
TABELA 3 – Comparação das propriedades mecânicas das ligas de alumínio 3104 e 5052.	22
TABELA 4 – Comparação das composições químicas das ligas de alumínio 3104 e 5052.	23
TABELA 5 – Compilação das características ecológicas das ligas de alumínio, ligas de magnésio, ligas de titânio e aços.	36
TABELA 6 – Composição química das ligas de alumínio classes 3104-H34 e 5052-H32.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AA</i>	<i>Aluminium Association</i>
<i>ABAL</i>	Associação Brasileira do Alumínio
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ACV</i>	Avaliação de Ciclo de Vida
<i>CFC</i>	Cúbica de Face Centrada
<i>CH₄</i>	Metano
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>DRX</i>	Difração de Raios-X
<i>GEE</i>	Gases de Efeito Estufa
<i>ICDD</i>	Centro Internacional de Dados de Difração
<i>MEV</i>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<i>NO_x</i>	Óxido de Nitrogênio
<i>%WT</i>	Percentual em Peso
<i>PLC</i>	Portevin-Le Chatelier
<i>ASTM</i>	Sociedade Americana para Testes e Materiais
<i>SO_x</i>	Óxido de Enxofre
<i>TCC</i>	Trabalho de Conclusão de Curso
<i>UFSM</i>	Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

K	Coeficiente de Resistência
γ	Deformação Plástica por Cisalhamento
n	Expoente de Encruamento
τ_c	Limite de Cisalhamento
σ_e	Limite de Escoamento
σ_f	Limite de Ruptura
H	Microdureza Vickers
E	Módulo de Young
τ_e	Tensão de Escoamento por Cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	16
2.1.1	Ligas de alumínio da classe 3xxx vs. ligas de alumínio da classe 5xxx	20
2.1.2	Comportamento do alumínio e suas ligas durante a deformação plástica ...	24
2.1.3	Aplicações do alumínio e suas ligas no setor da mobilidade	26
2.2	O CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS	29
2.2.1	Estratégias para tornar os automóveis mais ecologicamente	30
2.2.2	Estágios da vida de um material em produtos e os impactos associados ...	32
2.2.3	Os atributos ecológicos das ligas de alumínio	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	MATERIAIS	37
3.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	38
3.2.1	DETERMINAÇÃO DA MICROESTRUTURA E DUREZA	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	41
4.2	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.1	CONCLUSÕES	50
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de materiais com melhores propriedades ecológicas (baixa energia incorporada, baixo consumo de recurso hídricos e baixa emissão de carbono) se tornou a lógica de mercado para modernização e competição por inovação. Combinada com o próprio potencial do mercado, estas necessidades ambientais servem como fundamentos para a “modernização ecológica” ocorrer (JANICKE, 2008). Ao longo do ciclo de vida dos materiais, há o consumo de energia e de insumos primários, tal como a emissão de calor de baixo grau, e de resíduos sólidos e gasosos (LIU et al., 2012). Neste contexto, ao término da vida útil do produto manufaturado a busca por sua reutilização visa aumentar o seu crédito de energia, de modo que se busca à seleção de materiais com rotas de reciclagem consolidadas (DOBRZAŃSKI, 2006).

No caso do setor aeronáutico, as ligas de alumínio da série 3xxx possuem aplicações distintas dentro da categoria, tendo possíveis aplicações em componentes não estruturais das aeronaves, como: carenagens, filetes, tanques, calota de rodas, bico, capotas. Usualmente são utilizadas em componentes automotivos como: radiadores e painéis interiores. As ligas de alumínio da série 5xxx são ocasionalmente utilizadas em estruturas aeronáuticas, normalmente utilizadas em: pontas e nervuras de asa, tanques, tubos, reforços e fuselagem (MOURITZ, 2012). No setor da mobilidade, as ligas de alumínio da série 3xxx têm sido cada vez mais empregadas em substituição as da série 5xxx, em virtude da primeira possuir uma cadeia de reciclagem melhor consolidada que a segunda, em função de ser intensivamente empregada na produção de embalagens pelo setor alimentício (BIANCHI et al., 2019). Como os tratamentos térmicos nestas ligas são inócuos, estas são conformadas a frio para a produção de componentes planos, operação que confere um incremento às suas propriedades mecânicas por efeito do encruamento (TOTTEN; MACKENZIE, 2003).

Os principais modos de falha destes componentes de estruturas conformados a frio se processam por cisalhamento. Como é amplamente conhecido, esse fenômeno é influenciado por vários fatores, incluindo as alterações na estrutura cristalina do material resultantes de seu processamento, que são responsáveis por variações em seu comportamento. Esse conjunto de fatores pode resultar em desempenhos distintos durante a fabricação ou operação, mesmo em materiais com resistência mecânica semelhante (BIANCHI et al., 2019) .

Para minimizar o problema de falha desses componentes durante sua etapa de fabricação por conformação mecânica, é desejável uma boa enformabilidade, permitindo que o material seja facilmente deformado plasticamente sem sofrer rupturas (FILHO; MARCONDES, 2008). Em função disso, a avaliação prévia do seu desempenho durante condições de carregamento similares à de fabricação, baseada nos modos de falha mais re-

correntes durante o seu processamento, deve ser investigada e os fatores de influência entendidos (ANANDA VEL, 2021).

Dentre os modos de falha mais recorrentes em operações de conformação de chapas metálicas tem-se a sua ruptura por cisalhamento. Um dos principais fatores que influenciam sobre a sua ocorrência constitui as características anisotrópicas da chapa, resultantes da sua laminação prévia. Portanto, é fundamental determinar o efeito da anisotropia no comportamento de cisalhamento dos materiais durante sua deformação plástica para uma parametrização adequada das operações subsequentes de conformação mecânica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar comparativamente o efeito da anisotropia sobre a resistência ao cisalhamento simples de chapas de alumínio 5052-H32 e 3104-H34. Para tanto, será empregada uma configuração de corpo de prova proposta por Merklein e Biasutti (2011) baseada no padrão da norma ASTM B831-05.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atender ao seu propósito principal, os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

- Efetuar a caracterização da microestrutura e das fases cristalinas presentes nas ligas de alumínio 3104-H34 e 5052-H32.
- Estabelecer um procedimento para a realização dos ensaios de cisalhamento, baseado em normas e referências bibliográficas pertinentes.
- Avaliar a resistência ao cisalhamento das ligas de alumínio 3104-H34 e 5052-H32 por meio de ensaios uniaxiais de tração.
- Analisar o efeito da orientação de laminação no desempenho ao cisalhamento das ligas de alumínio 3104-H34 e 5052-H32.

1.2 JUSTIFICATIVA

O emprego dos materiais metálicos, especialmente do alumínio e suas ligas, é fundamental para a engenharia moderna. Esses materiais oferecem propriedades mecânicas, como resistência e leveza, que os tornam vitais em inúmeras aplicações industriais e estruturais. Além disso, o estudo de suas propriedades e seu comportamento durante o ciclo de vida é essencial para a inovação e a sustentabilidade em vários setores.

Cada ação realizada pelo homem influencia o ambiente que nos cerca. O ambiente, por sua vez, tem a capacidade de lidar com os efeitos dessas ações até certo ponto, de forma a evitar danos permanentes. Mas como se já é notado nos dias atuais, as atividades humanas contemporâneas ultrapassam esse limite com uma frequência crescente. Parte desse impacto é atribuída às operações da indústria de transformação, responsável pela fabricação de bens de consumo e de capital a partir de materiais de engenharia.

O consumo global de materiais de engenharia ultrapassa atualmente a marca de 10 bilhões de toneladas anuais. Esses materiais, juntamente com a energia requerida para sua fabricação e modelagem, são provenientes da extração de recursos naturais, como minerais metálicos e hidrocarbonetos fósseis. Apesar do consumo desenfreado ao longo dos últimos séculos, é inegável que tais recursos não são infinitos. A percepção de sua finitude e a possível aproximação de limites fundamentais ganharam destaque no início do século 21. Contudo, o crescimento populacional, especialmente nas economias emergentes, tem contribuído para um aumento significativo no consumo per capita de materiais e, por conseguinte, na exploração de recursos naturais essenciais à sua produção.

Diante desse panorama, torna-se pertinente investigar a reutilização de materiais de engenharia após o descarte de produtos ao alcançarem o final de sua vida útil, uma vez que as considerações ambientais estão cada vez mais imperativas. Dessa forma, a justificativa para a realização deste estudo reside na intenção de contribuir para o desenvolvimento da economia circular de materiais. Essa contribuição se materializa por meio da análise comparativa do desempenho mecânico de duas ligas de alumínio, visando à substituição da liga 5052-H32 pela 3104-H34 na fabricação de componentes estruturais para sistemas de mobilidade. Vale ressaltar que a liga 3104-H34 apresenta uma cadeia de reciclagem mais robusta em comparação com a 5052-H32, devido ao seu uso na produção de embalagens para acondicionamento de alimentos e bebidas e utensílios domésticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo explorar em detalhes o comportamento das ligas de alumínio classe 3xxx e 5xxx, destacando os principais aspectos relacionados as suas características e ao seu ciclo de vida. Inicialmente, será apresentada uma análise aprofundada das propriedades destas ligas, abordando suas características intrínsecas, como composição química, resistência, ductilidade e processabilidade, e suas aplicações práticas em diversas indústrias com enfoque especial à indústria automotiva.

Em seguida, serão examinados os conceitos relacionados ao ciclo de vida das ligas de alumínio, que envolvem desde a extração de matérias-primas até a produção, utilização, reutilização e descarte dos produtos, destacando os impactos associados a cada etapa desse processo. A análise cuidadosa dessas fases é crucial para compreendermos a importância da sustentabilidade e da redução do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida dos materiais.

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é um metal leve, maleável e altamente resistente à corrosão, apresentando uma cor prateada e destacando-se por sua alta condutividade térmica e elétrica. Sua abundância na crosta terrestre o torna o metal mais comum do planeta, sendo extraído principalmente da bauxita. Um dos principais atrativos do alumínio é sua elevada resistência mecânica específica, que se refere à relação entre resistência e peso. Quando ligado, este metal apresenta uma resistência e rigidez comparáveis às do aço, porém é aproximadamente um terço mais leve. Além disso, sua maleabilidade permite uma moldagem versátil, possibilitando a produção de diferentes formas e estruturas, o que contribui para sua versatilidade em aplicações industriais e de engenharia (BARBOSA, 2014).

Outro ponto essencial é a resistência à corrosão. O alumínio naturalmente forma uma camada de óxido em sua superfície, oferecendo proteção contra a oxidação. Essa camada tem a capacidade de se regenerar rapidamente quando danificada, garantindo uma eficaz proteção contra a corrosão em diversos ambientes. Ademais, o alumínio se destaca por ser um excelente condutor de eletricidade e calor, sendo amplamente utilizado em componentes eletrônicos, condutores elétricos e sistemas de resfriamento, devido à sua eficiência nessas aplicações (REBOUL; BAROUX, 2011).

Sua maleabilidade, baixa tensão de ruptura e baixo ponto de fusão conferem alta manufaturabilidade, permitindo o seu fácil processamento através de processos de fabricação que envolvem operações, formação, remoção e adição de material. Em diversas indústrias, como construção civil, indústria automobilística, aeroespacial, embalagens e

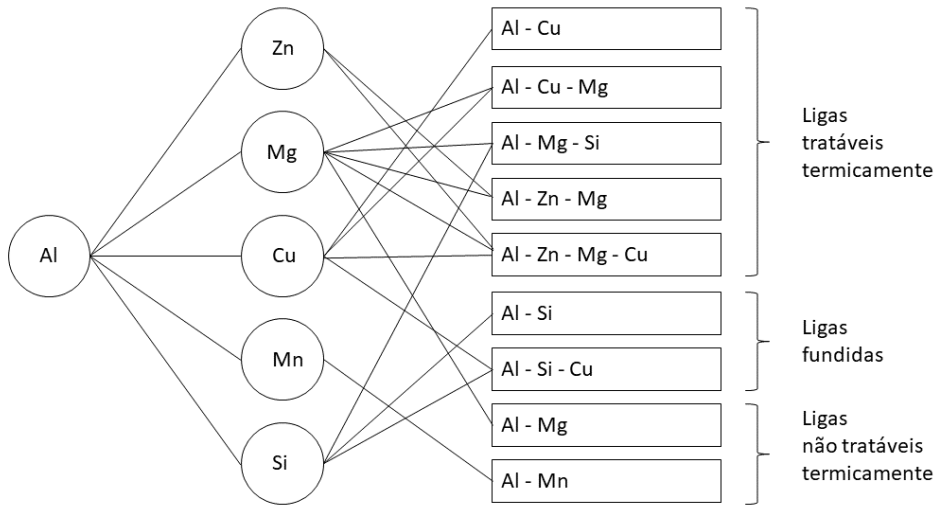
utensílios domésticos, o alumínio é largamente utilizado devido à sua combinação única de propriedades, proporcionando eficiência e desempenho a uma variedade de produtos e estruturas na engenharia (HUSKINS; CAO; RAMESH, 2010).

O alumínio puro, embora possua várias qualidades atrativas, apresenta uma limitação significativa em termos de resistência mecânica. Esse aspecto pode ser desfavorável em aplicações que exigem maior resistência estrutural ou durabilidade. Uma estratégia comum e eficaz para superar essa limitação é a formação de ligas metálicas. As ligas de alumínio são criadas combinando esse metal com outros elementos metálicos, visando aprimorar suas propriedades mecânicas, como resistência, dureza e tenacidade (COUTINHO, 1980).

A introdução de elementos de liga tem um efeito positivo na resistência mecânica do alumínio, permitindo a adaptação das suas propriedades para atender a requisitos específicos de diferentes indústrias, expandindo o seu campo de aplicação. As ligas de alumínio têm sido amplamente utilizadas em indústrias automotivas, aeroespaciais, de construção, entre outras, devido à sua capacidade de proporcionar uma combinação única de propriedades físicas, químicas e mecânicas. A habilidade de ajustar e melhorar as características do alumínio por meio das ligas permite uma adaptação mais eficiente a diversos cenários de uso, tornando-o um material valioso e altamente competitivo na indústria moderna (HUSKINS; CAO; RAMESH, 2010).

A literatura, conforme Dean (1990), relata a capacidade do alumínio de formar ligas com mais de cem elementos químicos da tabela periódica. No entanto, devido à natureza nociva, alto custo e/ou baixo interesse comercial de muitos desses elementos, a quantidade de adições de ligas ao alumínio é consideravelmente limitada. Segundo o mesmo autor, os principais elementos químicos adicionados ao alumínio são silício (Si), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e magnésio (Mg). A Figura 1 ilustra o esquema das várias combinações possíveis desses elementos químicos, formando ligas binárias, ternárias e quaternárias com o alumínio, bem como as características dessas ligas.

Figura 1 – Adição de elementos químicos ao alumínio e suas respectivas ligas e características.



Fonte: (DEAN, 1990)

O zinco (Zn) é adicionado com o propósito de aumentar a resistência mecânica e favorecer o endurecimento por precipitação das ligas de alumínio. O cobre (Cu) tem efeito semelhante, porém prejudica a resistência à corrosão, ductilidade e capacidade de soldagem da liga. A adição de magnésio (Mg) reduz a temperatura de fusão da liga, facilitando o processamento por fundição. Além disso, aumenta a resistência à corrosão em soluções com íons de cloreto e melhora a resposta à deformação a frio. De maneira similar ao Mg, o silício (Si) também reduz o ponto de fusão da liga, ao mesmo tempo em que melhora sua resistência mecânica e ductilidade. Quando adicionados em conjunto, Mg e Si promovem o endurecimento por precipitação da liga. A incorporação de manganês (Mn) ao alumínio comercial aumenta sua resistência, embora possa reduzir levemente a ductilidade e a susceptibilidade à corrosão sob tensão (MAZZOLANI, 1994).

Conforme mencionado por Dean (1990), além dos elementos previamente citados, as ligas de alumínio podem conter outros elementos, tais como cobalto (Co), níquel (Ni), titânio (Ti), cromo (Cr), ferro (Fe) e zircônio (Zr), normalmente adicionados com propósitos específicos. O Ni contribui para aumentar a resistência das ligas de Al em altas temperaturas, o Ti auxilia no refinamento dos grãos, o Zr influencia nos mecanismos de precipitação, o Cr melhora a resistência à corrosão sob tensão e, por fim, o Fe, em pequenas porcentagens, aumenta a resistência do alumínio comercialmente puro. O chumbo (Pb) é considerado uma impureza nas ligas de Al, cuja adição pode promover fragilidade em altas temperaturas durante processos termomecânicos, uma vez que as temperaturas de operação são superiores ao ponto de fusão do Pb (CARVALHO, 2000).

A variação na composição química, aliada à rota convencional de fabricação, é utilizada para categorizar as ligas de alumínio em diferentes famílias. O sistema de classificação dessas ligas emprega um código numérico composto por quatro dígitos, dividido em duas partes: uma para peças forjadas (1xxx) e outra para peças fundidas (1xx.x). A distinção entre a classificação de ligas forjadas e fundidas reside no ponto decimal, o qual é aplicado após o terceiro dígito, sendo utilizado apenas para as ligas fundidas. Conforme os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), as ligas de alumínio forjadas ou fundidas recebem designações de acordo com os elementos de liga adicionados, resultando em oito classes distintas informadas na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das ligas de alumínio forjadas e suas principais aplicações.

Série	Composição química	Aplicações principais
1xxx	Al comercialmente puro	Cabos, utensílios domésticos, trocadores de calor
2xxx	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica
3xxx	Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas, painéis
4xxx	Al-Si	Pistões forjados de motores, metal de adição para soldagem
5xxx	Al-Mg	Aplicações náuticas, tanques de combustível e produtos especiais
6xxx	Al-Mg-Si	Perfis arquitetônicos, componentes automotivos
7xxx	Al-Zn e Al-Zn-Mg	Indústria aeronáutica
8xxx	Outras ligas (Al-Li, Al-Fe...)	Laminados finos e outras para embalagens descartáveis.

Fonte: (BARBOSA, 2014)

Nas ligas de Al das séries 2xxx a 8xxx, se o segundo dígito for zero, isso indica que a composição química da liga de Al é similar àquela da liga originalmente desenvolvida. Se o segundo dígito for de 1 a 9, indica que a composição química da liga de Al sofreu alguma alteração em relação ao original. O terceiro e o quarto dígitos diferenciam as diversas ligas de Al pertencentes à mesma série, em função de variações composicionais (DAVIS, 1993).

Pode-se ainda realizar uma distinção e de acordo com o seu tratamento mecânico ou térmico de cada uma das séries de ligas de Al. Neste caso, após os quatro dígitos indicativos da classe, introduz-se um hífen e a especificação do tratamento realizado, o qual geralmente é composto por uma letra (tabela 2) junto com um conjunto de números. A escolha do tratamento utilizado nas ligas de alumínio depende de sua composição química e da sua aplicação (GROOVER, 2014). Neste sentido, as ligas de Al que integram as séries 2xxx, 6xxx e 7xxx correspondem a ligas tratáveis termicamente, ao passo que as ligas pertencentes às séries 3xxx, 4xxx e 5xxx constituem ligas endurecíveis por deformação (BARBOSA, 2014).

Tabela 2 – Designação dos tratamentos para ligas de alumínio.

Descrição	Tratamento
Estado de fabricação, sem nenhum tratamento especial	F
Encruado – seguido por dois números, o primeiro indica o tratamento térmico e o segundo o grau de trabalho a frio remanescente	H
Recozido – redução da resistência ao seu estado mais baixo	O
Tratamento térmico para produzir estruturas estáveis diferentes das obtidas nos tratamentos anteriores – seguido por um dígito para indicar o tratamento específico	T
Tratamento térmico de solubilização – aplicado às ligas que endurecem em serviço (tratamento instável)	W

Fonte: (GROOVER, 2014) e (MELLO S. R. C. DE; SOUZA, 2009)

Levando em conta a ênfase específica deste trabalho, serão apresentadas separadamente, nos próximos tópicos, apenas as características das ligas de alumínio das classes 3xxx e 5xxx.

2.1.1 Ligas de alumínio da classe 3xxx vs. ligas de alumínio da classe 5xxx

A primeira liga comercial da série 3xxx, o 3S, surgiu de investigações conduzidas em 1906 por Earl Blough. Ele buscava uma liga de alumínio para fabricação de estojos de câmeras que fosse resistente à corrosão. Ao adicionar manganês ao alumínio, ele descobriu que obtinha uma chapa maleável, com resistência mecânica moderada e excelente resistência à corrosão. Seu trabalho foi fundamental para a composição da liga 3003, com 1,25% de manganês e 0,13% de cobre. A liga 3003 ainda é uma das mais amplamente utilizadas entre todas as ligas de alumínio, com inúmeras aplicações envolvendo o emprego de chapas finas. Na década de 1920, surgiu a necessidade de uma liga mais resistente do que a 3S, mas que não apresentasse a mesma dificuldade para ser laminada a frio nos equipamentos existentes como as ligas de Al-Mg. Em 1929, a Alcoa Alloy 4S, essencialmente a 3S com adição de 1% de Mg, foi utilizada comercialmente pela primeira vez. Na década de 1940, essa liga foi temporariamente substituída pelas ligas 5xxx, porém, mais tarde, retornou à produção. Até o final dos anos 1980, a Alloy 3004 era a principal liga usada para a fabricação de corpos de embalagem de alimentos e bebidas, tornando-se a liga de alumínio com o maior volume de produção (RUNGE, 2018).

As ligas 5xxx, por sua vez, foram inicialmente desenvolvidas na década de 1930 em resposta à demanda por materiais de chapa com maior resistência, boa conformabilidade e altos níveis de resistência à corrosão e soldabilidade. Os primeiros usos registrados de 52S (posteriormente 5052), 56S (5056) e X54S (5154) ocorreram entre 1932 e 1934. Entretanto, problemas na fabricação dessas ligas e na instabilidade das suas têmperas endurecidas por deformação limitaram sua aplicação generalizada por muitos anos. A escassez de Mg durante a Segunda Guerra Mundial também restringiu o desenvolvimento

das ligas Al-Mg. A introdução de tecnologias avançadas de fusão e filtração de metal, e o desenvolvimento de laminadores mais eficazes resolveram em grande parte os problemas de fabricação para ligas contendo até aproximadamente 5,5% de Mg. Nas décadas de 1950 e 1960, houve o desenvolvimento e registro de diversas novas composições de ligas 5xxx. As ligas 5082 e 5182, amplamente produzidas para o mercado de latas de bebidas no final da década de 1980, foram introduzidas em 1963 e 1967, respectivamente. As propriedades atraentes das ligas 5xxx as tornam úteis em várias formas, como na produção de fundidos, extrudados, trefilados e laminados. Atualmente, mais de 30 ligas 5xxx estão registradas na *Aluminum Association* e são utilizadas em aplicações tão diversas como chapas para recipientes rígidos, arame de tela e placas de blindagem balística (RUNGE, 2018).

A partir da composição original, as ligas de alumínio das classes 3xxx e 5xxx têm sido continuamente melhoradas e ajustadas para atender às demandas específicas de várias indústrias, como embalagens, automotiva, aeronáutica, entre outras. Especificamente, as ligas de alumínio 3104 e 5052 apresentam diferenças e semelhanças distintas em suas características e propriedades. A liga de alumínio 3104, parte da série 3xxx, é composta principalmente pelos elementos de liga manganês e magnésio, enquanto a liga de alumínio 5052, pertencente à série 5xxx, possui o magnésio como o principal elemento de liga. Em termos de resistência à corrosão, ambas as ligas exibem boas propriedades, mas a liga 5052 se destaca, por sua excelente resistência à corrosão em ambientes de maior severidade, como o marinho e químico, sendo superior nesse aspecto à liga 3104. Quanto à manufaturabilidade, ambas as ligas são facilmente conformáveis, permitindo o processamento por meio de diversos processos de fabricação por deformação plástica. No entanto, a 5052 tende a ter uma resistência mecânica mais elevada em comparação com a 3104, conferindo-lhe maior aplicabilidade em situações onde a resistência é crucial. A aplicação de ambas as ligas varia: a liga 3104 é frequentemente usada na fabricação de embalagens, como latas de bebidas e recipientes para alimentos, enquanto a 5052 é utilizada em indústrias como automotiva, aeronáutica e naval, sendo aplicada na fabricação de componentes de veículos, equipamentos marítimos e estruturas arquitetônicas, especialmente onde a resistência à corrosão é fundamental. Resumidamente, a liga de alumínio 3104 apresenta boas características de resistência à corrosão e conformabilidade, sendo empregada principalmente em embalagens. Por outro lado, a 5052 apresenta excelente resistência à corrosão, boa conformabilidade e maior resistência quando comparada à 3104, sendo utilizada em aplicações que demandam melhor desempenho mecânico e durabilidade, especialmente em ambientes corrosivos (BADKE, 2021), (KAPP, 2021).

Na Tabela 3, estão compiladas algumas das propriedades mecânicas das ligas de alumínio 3104 e 5052, submetidas aos tratamentos utilizados neste estudo (H34 e H32, respectivamente). Os tratamentos do tipo H3x são aqueles nos quais o material, após ser encruado, é estabilizado. Isso acontece porque, após serem submetidas ao trabalho a

frio, as ligas de Al têm a tendência de amolecer ao longo do tempo em temperatura ambiente. Para controlar esse fenômeno, essas ligas são aquecidas em baixas temperaturas, acelerando controladamente o amolecimento e permitindo a obtenção de propriedades estáveis que favorecem as operações subseqüentes de trabalho mecânico. O segundo dígito do tratamento representa o grau de dureza obtido após a deformação plástica a frio e a estabilização, sendo $\frac{1}{2}$ duro para o dígito 4 e $\frac{1}{4}$ duro para o dígito 2. O tratamento H34 favorece a formação de precipitados de partículas finas, responsáveis pelo aumento da resistência mecânica do material e pela melhoria de sua conformabilidade. Enquanto isso, o tratamento H32 visa alcançar a máxima resistência mecânica. Ao comparar os dados da Tabela 3, observa-se que os valores do Módulo de Young, Limite de Resistência e Limite de Escoamento são equivalentes entre as duas ligas, mas o alongamento é significativamente menor na liga 5052. Essa semelhança entre as propriedades ocorre devido à estabilização da microestrutura e à uniformidade na distribuição das fases presentes nos materiais. Ambas as ligas, após os tratamentos mencionados, passam por um processo de endurecimento por precipitação, no qual a dispersão de precipitados finos melhora a resistência mecânica e a durabilidade dos materiais, conferindo características de conformabilidade adequadas para suas respectivas aplicações (BARBOSA, 2014).

Tabela 3 – Comparação das propriedades mecânicas das ligas de alumínio 3104 e 5052.

Material	Módulo de Young E (GPa)	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (Pa)	Alongamento (%)
3104 H34	73,0 ± 2	286,3 ± 21	203,2 ± 17	8,2 ± 0,5
5052 H32	75,6 ± 3	274 ± 8	164 ± 19	3,6 ± 0,3

Fonte: (BADKE, 2021) e (KAPP, 2021)

Conforme observado na Tabela 4, os elementos constituintes em ambas as ligas são os mesmos, diferenciando-se apenas nos níveis de concentração. Os principais elementos presentes na liga 3104 são o Mn e o Mg. O Mn proporciona um aumento modesto na resistência por meio da solução sólida nas ligas de alumínio. No entanto, o aumento do teor de Mn acima do limite indicado não apresenta a mesma eficácia em promover o endurecimento por trabalho quando comparado ao efeito alcançado pelo Mg. Portanto, o Mg é adicionado para atingir uma maior resistência mecânica. Durante a deformação a frio dessa liga, observa-se um aumento na densidade de discordâncias. A formação da estrutura de células, ou subgrãos, conforme discutido por (ETTORE, 2011), durante o processo de deformação a frio indica a ocorrência de recuperação dinâmica. Com o aumento da porcentagem de deformação a frio, a estrutura de subgrão torna-se mais definida e o tamanho dos subgrãos diminui, resultando em um aumento na resistência do material. A adição de Mg reduz a propensão à formação de células, porém, aumenta o conteúdo total de discordâncias na liga à medida que o teor desse elemento é incrementado.

Tabela 4 – Comparação das composições químicas das ligas de alumínio 3104 e 5052.

Material / Elemento químico	Composição (% em peso)						
	Mn	Mg	Cu	Si	Fe	Cr	Zn
3104	0,8-1,4	0,8-1,3	0,5-0,25	0,6	0,8	-	0,25
5052	0,1	2,2-2,8	0,1	0,25	0,4	0,15-0,35	0,1

Fonte: Aluminium Association(2021).

Nas ligas da série 5xxx, o elemento principal é o Mg, que apresenta alta solubilidade no alumínio (até 14,9% em peso a 451 °C, a temperatura eutética binária). No entanto, essa solubilidade diminui para cerca de 1,7% em peso à temperatura ambiente, com uma taxa de decomposição muito lenta da solução sólida supersaturada. Na liga 5052, a maior parte do Mg permanece retida em solução, contribuindo para o endurecimento da matriz de alumínio. Tanto a resistência ao escoamento quanto à resistência à tração aumenta com o acréscimo do teor de Mg em solução, enquanto a elongação diminui consideravelmente, mesmo com pequenas adições desse elemento. Embora o Mg em solução sólida proporcione tal fortalecimento, o maior impacto no aumento de resistência se dá por sua atuação nos processos de endurecimento por trabalho a frio. A adição de Mg ao alumínio puro altera os parâmetros de conformabilidade da liga. Com o aumento do teor de Mg, o expoente de encruamento n permanece constante, mas o coeficiente de resistência (K) aumenta, indicando que o Mg amplia a taxa de endurecimento por encruamento. Essa influência do Mg na resistência do alumínio durante a deformação a frio está associada ao seu efeito no desenvolvimento e retenção de tensão residual na rede cristalina, assim como na formação de 'subgrãos' (KAUFMAN, 2001).

Devido à alta energia de falha de empilhamento do alumínio, o cruzamento de discordâncias é facilitado, e processos de recuperação ocorrem facilmente no alumínio durante a deformação. Teores mais elevados de Mg resultam em um aumento mais acelerado na tensão na rede cristalina e maiores quantidades de deformação. Assim, ao reduzir a energia de falha de empilhamento, ou por meio de alguma outra restrição na mobilidade das discordâncias, o Mg reduz a tendência à recuperação dinâmica e ao rearranjo das discordâncias em configurações de menor energia. O resultado final é um aumento no conteúdo de discordâncias da liga e uma distribuição mais uniforme das mesmas. Dessa forma, ao suprimir a recuperação, o Mg aumenta tanto a multiplicação quanto as taxas de armazenamento de discordâncias, o que resulta em um incremento na resistência mecânica (KAUFMAN, 2001).

Na utilização de ambas as ligas, a combinação de Mg em solução sólida e trabalho a frio é altamente eficaz para alcançar elevada resistência. Contudo, há limitações práticas que restringem a extensão dessa combinação na produção de produtos conformados. Esses desafios incluem dificuldades de fabricação, como a formação de fissuras nas bordas durante o processo de laminação e estampagem, bem como a suscetibilidade de ligas com

altas concentrações de Mg à corrosão intergranular ou à corrosão sob tensão. No setor comercial, maiores resistências são atingidas pela adição em solução sólida de outros elementos de liga mencionados na Tabela 4. Essa adição precisa garantir um endurecimento adicional por trabalho, sem, no entanto, interagir quimicamente com o Mg e removê-lo da solução sólida (BARBOSA, 2014).

2.1.2 Comportamento do alumínio e suas ligas durante a deformação plástica

A deformação plástica nos metais e ligas desempenha papel crucial nas operações de fabricação por conformação mecânica. Os mecanismos pelos quais a deformação plástica se processa incluem o deslizamento de discordâncias, o deslizamento de maclas (*glide*) e o fenômeno de maclagem (*twinning*). É importante destacar que a predominância e a relevância de cada um destes mecanismos podem variar conforme a composição do metal, a temperatura de trabalho, a taxa de deformação e outros fatores específicos do processo de conformação mecânica (SCHÖN, 2013).

O escorregamento de discordâncias é o processo fundamental de deformação plástica em metais, consistindo no movimento dessas discordâncias ao longo dos planos cristalinicos do material. Esse deslizamento é responsável pela formação das texturas dos grãos. Ademais, em alguns metais, o deslizamento de maclas (*glide*) e o fenômeno de maclagem (*twinning*) também contribuem, em menor escala, para a deformação plástica, facilitando o movimento das discordâncias em determinadas condições (DIETER, 1981).

O alumínio e suas ligas, e a maioria dos metais com estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC), exibem alta deformabilidade devido à sua estrutura cristalina e à presença de múltiplos sistemas de escorregamento. Esses sistemas de escorregamento são constituídos por planos cristalinicos e direções específicas ao longo das quais as discordâncias podem se mover com maior facilidade. Esses planos e direções constituem aqueles de maior densidade atômica (planos que cortam o maior número de átomos na célula unitária, e dentro destes planos as direções de maior densidade linear). Nos metais com estrutura CFC, como o alumínio e suas ligas, os sistemas de escorregamento estão organizados em múltiplos planos (4 planos) e direções (3 direções por plano). Esse arranjo cristalino oferece mais caminhos para o movimento das discordâncias, tornando mais fácil a deformação plástica quando uma força é aplicada. Os átomos nesses metais são dispostos de maneira mais compacta e regular, facilitando o movimento das discordâncias quando uma tensão mecânica é aplicada (ASKELAND, 2015).

Conforme o material passa por deformação plástica, acontece o fenômeno do encruamento, ocasionando o acúmulo de discordâncias e outros defeitos cristalinicos. Esse processo resulta na diminuição da maleabilidade e no aumento da resistência à deformação do material. Por esse motivo, é comum inserir entre etapas consecutivas de confor-

mação mecânica tratamentos térmicos para aliviar tensões. Em temperaturas elevadas e após certa quantidade de deformação, os grãos da microestrutura do metal podem passar por recristalização, realocando-se para criar novos grãos sem discordâncias. Isso auxilia na recuperação parcial da ductilidade do material. Já em temperaturas moderadas, ocorre um processo de restauração ou recuperação. Nesse caso, não há recristalização, apenas anulação e reorganização das discordâncias, aliviando tensões residuais, porém sem restaurar completamente a microestrutura original do material (CALLISTER, 2020).

A aplicação do tratamento de alívio de tensões em produtos conformados pode impactar significativamente o custo final do produto. Embora seja essencial para melhorar as propriedades mecânicas, aumentar a estabilidade dimensional do material e reduzir o risco de falha do produto, a aplicação deste tratamento requer equipamentos especializados e tempo adicional de processamento, o que pode aumentar os custos de produção. Além disso, dependendo do tipo de liga, tamanho e complexidade da peça, o tratamento térmico pode exigir instalações específicas e controle rigoroso de temperatura e tempo, o que também influencia os custos operacionais. Portanto, embora o alívio de tensões seja importante para garantir a qualidade e a durabilidade do produto final, ele pode impactar o custo total de produção devido aos requisitos adicionais de recursos e tempo envolvidos no processo (SILVA ALV; MEI, 2010). Por essas razões, o tratamento mencionado geralmente não é realizado em chapas finas após a laminação, nem mesmo em produtos estampados.

A deformação plástica produzida pela laminação a frio, uma etapa inevitável do processo de produção das chapas metálicas, induz variações direcionais nas propriedades mecânicas, resultantes do desenvolvimento da textura no plano determinado pela direção de laminação e pela direção normal ao plano da chapa. A menos que sejam aplicados outros tratamentos para remover essa textura, o que, como visto anteriormente, não é uma prática comum nesses casos, as propriedades mecânicas anisotrópicas se tornam inerentes ao material bruto utilizado nas operações subsequentes de conformação de chapas (WU P.D.; JAIN, 2003).

Peças de geometria complexa, produzidas a partir de chapas de ligas de alumínio com formatos que abrangem grandes variações de curvatura e cavidades profundas, são frequentemente empregadas na concepção e montagem de componentes estruturais avançados nas indústrias aeroespacial e automotiva. O processo de estampagem profunda é uma das principais técnicas de fabricação capaz de moldar tais geometrias a partir de chapas planas, não só reduzindo custos, mas também melhorando o desempenho dos produtos (DURSUN T.; SOUTIS, 2014). Contudo, a formabilidade das chapas utilizadas nesses processos é insatisfatória devido à sua alta anisotropia. Como resultado, muitas formas geométricas não podem ser produzidas em chapas de alumínio por meio de uma única operação de estampagem profunda. Por esses motivos, o processo de estampagem profunda é frequentemente realizado em várias etapas para fabricar peças com essas características, o que pode resultar em defeitos intrínsecos à anisotropia, como excesso de

enrugamento, rasgos, orelhas e fissuras (XU, 2022).

Portanto, a precisa quantificação do efeito da anisotropia sobre as propriedades mecânicas das chapas metálicas é crucial para planejar os processos subsequentes de conformação. Compreender o impacto da anisotropia é fundamental para antecipar e minimizar possíveis defeitos durante a conformação de produtos planos. Ao conhecer as características anisotrópicas do material, é possível ajustar os parâmetros do processo, como a taxa de deformação e a sequência de operações de conformação, para mitigar defeitos nos produtos conformados. Nesse contexto, a abordagem experimental ainda é considerada a ferramenta de diagnóstico mais adequada para a investigação da anisotropia (CHAIMONGKON T.; UTHAISANGSUK, 2020).

Tendo em vista que, durante as operações de conformação de chapas metálicas, o material é submetido a altas tensões de cisalhamento, a caracterização experimental do seu comportamento sob esse tipo de carregamento é um método importante para obter dados confiáveis sobre a sua processabilidade, visando o planejamento de suas operações de conformação (BAE; GHOSH, 2003). Esse comportamento é investigado por métodos padronizados de caracterização de materiais, como o teste de tração uniaxial (WU P.D.; JAIN, 2003), e pode ser correlacionado à avaliação do efeito da anisotropia, assunto este que é o escopo deste trabalho.

2.1.3 Aplicações do alumínio e suas ligas no setor da mobilidade

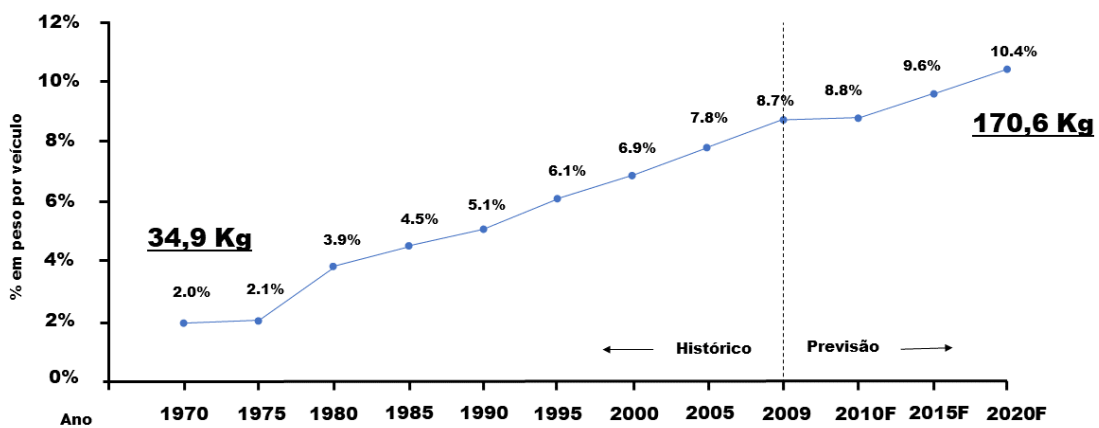
No ano de 1997, o Protocolo de Kyoto estabeleceu prazos e metas globais para a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE), principalmente focando em gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Com metas desafiadoras, visava-se reduzir, até 2012, as emissões mundiais de GEE para aproximadamente 95% em relação aos níveis registrados em 1990, mesmo diante do crescimento econômico, aumento populacional e da expansão da frota de veículos global. Considerando que o CO_2 é o principal gás implicado no efeito estufa, proveniente da queima de combustíveis fósseis, torna-se crucial reduzir a demanda energética por essa matriz para alcançar uma redução efetiva de GEE (MAGNUSSON, 2000).

No setor de mobilidade, que abrange veículos automotores, rodoviários, agrícolas, ferroviários e outros, uma das principais estratégias para alcançar essa redução é melhorar a eficiência energética dos veículos, visando diminuir o consumo de combustível, especialmente por meio da redução da massa veicular. Para atingir essa meta, uma prática comum é a utilização de chapas metálicas mais finas na fabricação de seus componentes. No entanto, tais modificações devem ser feitas considerando critérios de custo, segurança e desempenho (LAJARIN, 2012). Outra alternativa para reduzir a massa dos veículos é substituir o aço por alumínio e suas ligas em componentes automotivos (RAMALHO

R.; LISBOA, 2019).

Embora seja o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, ficando atrás apenas do oxigênio e do silício, correspondendo a 7,3% da sua massa, o alumínio é um dos metais mais recentemente utilizados em larga escala na indústria (ABAL, 2011). Suas características, conferem uma posição de destaque no setor da mobilidade. O uso de chapas finas de ligas de alumínio na fabricação de peças automotivas tem proporcionado resultados significativos, levando a um aumento progressivo de sua utilização no setor da mobilidade ao longo dos últimos anos, conforme evidenciado na Figura 2. Dentre os exemplos da substituição de componentes de aço por componentes de alumínio, incluem-se: blocos de motores, partes da carroceria, radiadores, rodas, etc.

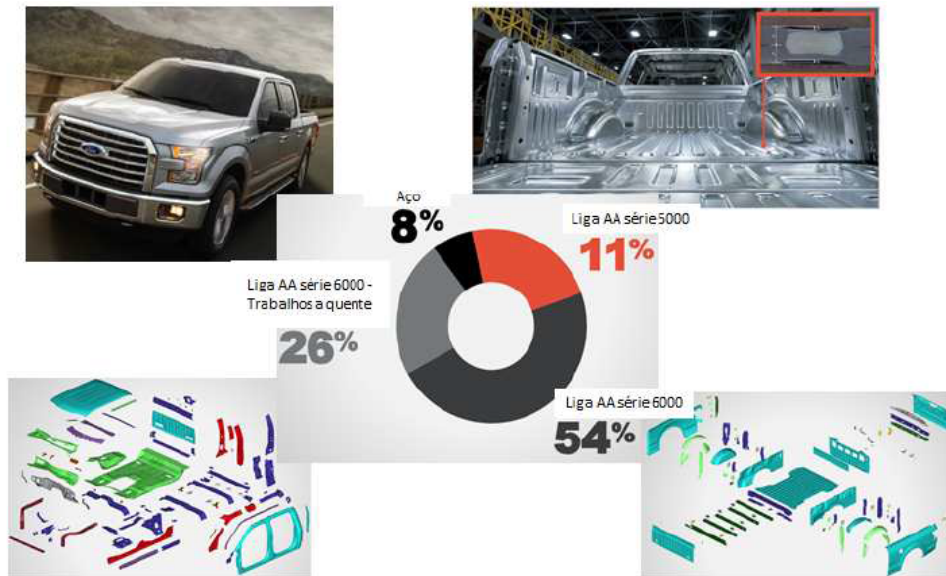
Figura 2 – Evolução do uso de ligas de alumínio em veículos automotores ao longo do tempo.



Fonte: (FILLETI, 2010)

Segundo (MARCONATO, 2009), na Europa, dois milhões de toneladas de componentes de alumínio foram utilizados nos carros fabricados em 2005, resultando em uma economia de peso que permitiu poupar anualmente um bilhão de litros de combustível e evitar a emissão de cerca de 40 milhões de toneladas de CO₂ durante a vida útil desses veículos. Nesse contexto, durante um dos maiores eventos automotivos globais, o Euro Car Body, ocorrido em outubro de 2015 na cidade de Bad Nauheim, Alemanha, foi lançada a nova Ford F-150, modelo 2016, um veículo de transporte de cargas para trabalhos robustos, líder de vendas nos Estados Unidos, que utiliza 92% de alumínio em sua estrutura (Figura 3).

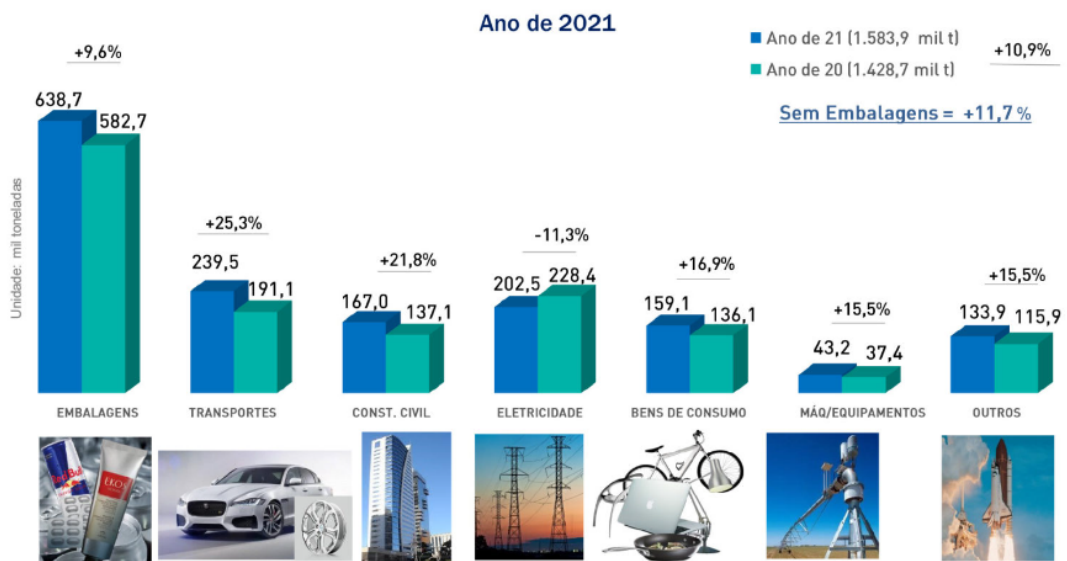
Figura 3 – Emprego de Alumínio na Ford F-150.



Fonte: Adaptado de Euro Car Body (2015)

No Brasil, o principal consumidor de alumínio é o setor de embalagens, seguido pelo setor de transportes e, posteriormente, pelo setor de construção civil, conforme apresentado na Figura 4. Conforme os dados da Figura 4, todos os setores, exceto o setor de eletricidade, apresentaram aumento no consumo de alumínio em 2021 em comparação a 2020. Vale ressaltar que a redução de 11,3% no consumo no setor de eletricidade está relacionada à diminuição do uso desse metal em projetos de linhas de transmissão de energia no país (ABAL, 2011).

Figura 4 – Distribuição percentual dos principais setores consumidores de alumínio no Brasil em 2021.



Fonte: (ABAL, 2011)

Atualmente, a indústria automotiva está direcionando seus esforços para uma ampla substituição dos metais ferrosos pelas ligas de alumínio, principalmente visando à redução de peso nos veículos, o que impulsiona a eficiência no consumo de combustível e aprimora as características de desempenho. Esta tendência inclui o desenvolvimento de ligas mais robustas, a ampliação de sua aplicação em vários componentes do veículo, além de um foco específico na sustentabilidade, promovendo a reciclabilidade do material. Concomitantemente, os avanços em tecnologias de produção estão aperfeiçoando a fabricação de peças de alumínio, tornando o processo mais eficiente e econômico para a indústria automotiva. Essas iniciativas refletem um compromisso com a inovação para atender aos padrões de desempenho, segurança e responsabilidade ambiental na fabricação de veículos (XU, 2022).

Com base na análise detalhada do alumínio e suas ligas, considerando sua classificação e propriedades, comportamento durante a deformação e aplicação no setor da mobilidade, torna-se imprescindível agora adentrar a etapa de compreensão mais abrangente sobre o ciclo de vida dessas ligas. Esta transição se torna essencial para explorar as principais emissões associadas ao ciclo de vida dos sistemas de mobilidade, contextualizando os impactos ambientais e os atributos ecológicos específicos das ligas de alumínio. A discussão sobre o ciclo de vida dos materiais se mostra vital para examinar de forma holística o papel do alumínio na mobilidade, abordando não apenas sua funcionalidade e eficiência, mas também sua pegada ambiental ao longo de todo o processo produtivo, utilização e descarte nos sistemas de transporte.

2.2 O CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS

A ideia de um ciclo de vida tem suas raízes nas ciências biológicas. Os organismos vivos nascem; eles se desenvolvem, amadurecem, envelhecem e, por fim, morrem. A progressão é intrínseca – todos os organismos seguem, de forma geral, o mesmo caminho – mas a maneira como se desenvolvem ao longo do percurso, e seu comportamento, tempo de vida e influência dependem de sua interação com o ambiente – o entorno no qual vivem (ASHBY, 2021).

As ciências biológicas rastreiam o desenvolvimento dos organismos e como estes se relacionam com o meio. A noção do ciclo de vida foi adaptada e implementada em diferentes áreas. Nas ciências sociais, é o estudo da interação dos indivíduos com seu ambiente social. Na gestão de tecnologia, é o estudo do nascimento, maturidade e declínio de uma inovação no ambiente empresarial. No projeto de produtos, é a interação dos produtos com os ambientes natural, social e empresarial. A preocupação com o esgotamento de recursos, a crise do petróleo no início dos anos 1970, seguida pelas primeiras evidências de aquecimento global induzido pelo carbono, concentrou a atenção em outro

campo: o ciclo de vida de produtos e sua interação, sobretudo, com o meio ambiente. Os produtos são compostos por materiais que formam sua estrutura básica e são essenciais para seu funcionamento. A análise do produto e seu ciclo de vida implica avaliar os impactos ambientais desde a obtenção das matérias-primas até sua reintegração na biosfera como "resíduos", englobando desde a origem até o descarte. Isso demanda o acompanhamento e análise dos materiais ao longo de toda a vida útil do produto (ASHBY, 2021).

Para alcançar esse propósito, é crucial identificar as fontes de emissões em todas as etapas de processamento dos materiais, desde a extração de matérias-primas até a disposição final dos resíduos, ao final da vida útil do produto. Compreender os impactos das emissões durante a produção, uso e descarte dos automóveis é fundamental para implementar estratégias eficazes para sua redução. Nesse sentido, as ligas de alumínio destacam-se pelos seus atributos ecológicos, oferecendo leveza, durabilidade e potencial de reciclagem. Sua aplicação na indústria automotiva contribui para a redução do peso dos veículos, resultando em menor consumo de combustível e emissões de CO₂ durante a sua vida útil. Além disso, a capacidade de reciclagem do alumínio ajuda a economizar energia e a reduzir a demanda por matérias-primas virgens, tornando-o um material ecoeficiente e relevante para a construção de um setor automobilístico mais ecologicamente responsável (JOVANOVIC; SANGUINO, 2023).

Assim, compreender os impactos ambientais provocados pelos automóveis requer um estudo fundamental do ciclo de vida dos materiais empregados na indústria automotiva. Por essa razão, nos próximos tópicos desta seção, serão discutidos três pontos fundamentais: estratégias para tornar os veículos mais ecologicamente sustentáveis, as principais emissões ao longo do ciclo de vida dos automóveis e os benefícios ambientais do emprego das ligas de alumínio nesse cenário. As emissões ao longo do ciclo de vida dos veículos, desde a produção até o descarte, têm impacto ambiental direto. Analisar essas etapas é essencial para avaliar o impacto e identificar maneiras de reduzi-lo. Por outro lado, as ligas de alumínio têm características ecológicas atrativas, como a capacidade de reduzir o peso dos veículos e serem recicláveis, alinhando-se à sustentabilidade e à economia circular. Esta seção explorará a importância dessas características das ligas de alumínio no ciclo de vida dos materiais na mobilidade, destacando seu papel na busca por práticas automotivas mais sustentáveis.

2.2.1 Estratégias para tornar os automóveis mais ecologicamente

A indústria automotiva contemporânea está constantemente em busca do desenvolvimento de automóveis mais ecológicos, utilizando abordagens inovadoras para reduzir o impacto ambiental promovido por eles em todas as fases do seu ciclo de vida, desde a etapa inicial de projeto e produção até o seu descarte. Os principais desafios enfrentados

nos últimos anos, que contribuíram para mudanças no emprego de materiais em veículos, podem ser resumidos em duas questões-chave: a demanda por redução no consumo de combustível desses veículos e a necessidade de reciclagem dos materiais utilizados na sua produção, ao final da vida útil (ALONSO, 2022).

A estratégia primordial para reduzir o consumo de combustível é a diminuição do peso. Além dos benefícios ambientais, a redução de peso contribui para melhorar a dinâmica do veículo, aumentar a segurança e possibilitar a incorporação de mais funcionalidades. Em 1923, Henry Ford reconheceu que "a redução de alguns kg no peso de um veículo, poderia resultar em um aumento de velocidade e uma redução no consumo de combustível durante o uso"(SALAVERRIA, 2009).

A redução do peso do veículo não apenas reduz o consumo de combustível, mas também diminui as emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente. A melhoria na eficiência do consumo pode ser obtida ao aumentar a eficácia termodinâmica do motor. Porém, ganhos mais significativos são alcançados através da redução do peso do veículo e da resistência aerodinâmica. Para atingir essa redução de peso, materiais de alta performance são cruciais. Materiais com resistência e rigidez específica elevadas, por exemplo, permitem a construção de estruturas leves e eficientes para suportar cargas. De maneira similar, materiais com capacidade de processamento aprimoradas possibilitam maior liberdade de projeto na produção de formas complexas, resultando em melhorias aerodinâmicas que contribuem para a redução adicional do consumo de combustível. A redução de peso implica na diminuição do uso de materiais, acarretando, conseqüentemente, na redução de custos de produção (FAOLEX, 2000).

Desde o início do século passado, houve o desenvolvimento de uma gama mais extensa de materiais, permitindo agora a redução de peso por meio do uso de materiais menos densos, proporcionando melhores relações entre propriedades e peso. Uma alternativa é a utilização de materiais poliméricos e compósitos. Outra possibilidade é a adoção de metais leves, como ligas de alumínio e magnésio. A densidade do alumínio equivale a aproximadamente 35% da do aço, enquanto a do magnésio corresponde a cerca de 23% da do aço e aproximadamente 65% da do alumínio. O titânio, outro metal leve, possui uma excelente relação entre resistência e peso, mas sua produção e conformação são complexas, o que o torna comparativamente dispendioso. As ligas de alumínio são mais atrativas devido às suas boas relações entre resistência e peso, facilidade de processamento, durabilidade, resistência térmica, capacidade de absorver energia sob carga, custos relativamente baixos e alta facilidade de reciclagem (ASHBY, 2021).

A incorporação significativa do alumínio e suas ligas na fabricação de veículos teve início aproximadamente há pouco mais de duas décadas, quando houve a transição de blocos de motor e cabeçotes de ferro fundido para ligas de alumínio. Esse processo de substituição está bem avançado, sendo as ligas de alumínio responsáveis por grande parte da produção de componentes do motor. Atualmente, o foco tem sido a estrutura da car-

roceria do veículo. Um veículo com carroceria de alumínio reduzirá o peso final em 50% em comparação com a construção tradicional de aço, resultando em uma economia de combustível entre 2% e 10% (SALAVERRIA, 2009).

O segundo fator crucial diz respeito à necessidade de reutilização dos materiais após a vida útil do automóvel. Anteriormente, a legislação europeia estabeleceu a exigência de que 85% dos veículos fossem reciclados até 2005 e 95% até 2015, mas não há dados atuais disponíveis para verificar se essas metas foram atingidas. A prática de reciclagem e reutilização dos materiais empregados na fabricação de automóveis ao término de sua vida útil é cada vez mais relevante na indústria automotiva. Com o avanço tecnológico e o crescente foco na sustentabilidade, há uma preocupação maior em reutilizar e reciclar materiais para evitar o descarte inadequado e reduzir o impacto ambiental. Materiais como aço, alumínio e plásticos, utilizados na construção de veículos, podem ser separados e reciclados de maneira eficiente. Esse processo possibilita a reintrodução de recursos valiosos, diminuindo a quantidade de resíduos e a necessidade de novos materiais. A reciclagem de materiais automotivos não apenas contribui para a preservação do meio ambiente, mas também promove uma gestão mais responsável dos recursos, em conformidade com os princípios da economia circular e da sustentabilidade na indústria da mobilidade (KEMP, 2020).

2.2.2 Estágios da vida de um material em produtos e os impactos associados

A Figura 5 ilustra as diferentes etapas que compõem o ciclo de vida dos materiais. Na primeira fase, ocorre a extração de minérios, matérias-primas e energia dos recursos naturais do planeta para a produção dos materiais. Estes são então processados na fase 2 para criar os produtos, que são distribuídos, comercializados e utilizados na fase 3. Ao atingirem o fim de sua vida útil (fase 4), os produtos são descartados, sendo que parte dos materiais contidos pode ser direcionada para um ciclo de reciclagem, enquanto o restante é encaminhado para incineração ou aterro sanitário (ASHBY, 2021).

A Figura 5 indica também o consumo de energia e materiais em cada fase do ciclo de vida. Esse consumo gera uma penalidade composta por dióxido de carbono (CO_2), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outras emissões, como resíduos gasosos, líquidos, sólidos e calor de baixa qualidade. Em baixas concentrações, a maioria desses elementos não representa riscos significativos, porém, à medida que suas concentrações aumentam, tornam-se prejudiciais. O cerne do problema reside no fato de que a soma desses subprodutos indesejados frequentemente ultrapassa a capacidade do ambiente em absorvê-los. Em alguns casos, os danos são localizados, e o responsável pelas emissões assume o ônus e os custos para contê-los e corrigi-los (este custo ambiental é denominado internalizado). Para outros casos, os danos são globais, e o emissor das

emissões não é diretamente responsabilizado, o que faz com que o custo ambiental seja transferido para a sociedade como um todo (sendo externalizado). O estudo do consumo de recursos, emissões e seus impactos é conhecido como Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ASHBY, 2021).

Figura 5 – As fases do ciclo de vida dos materiais.

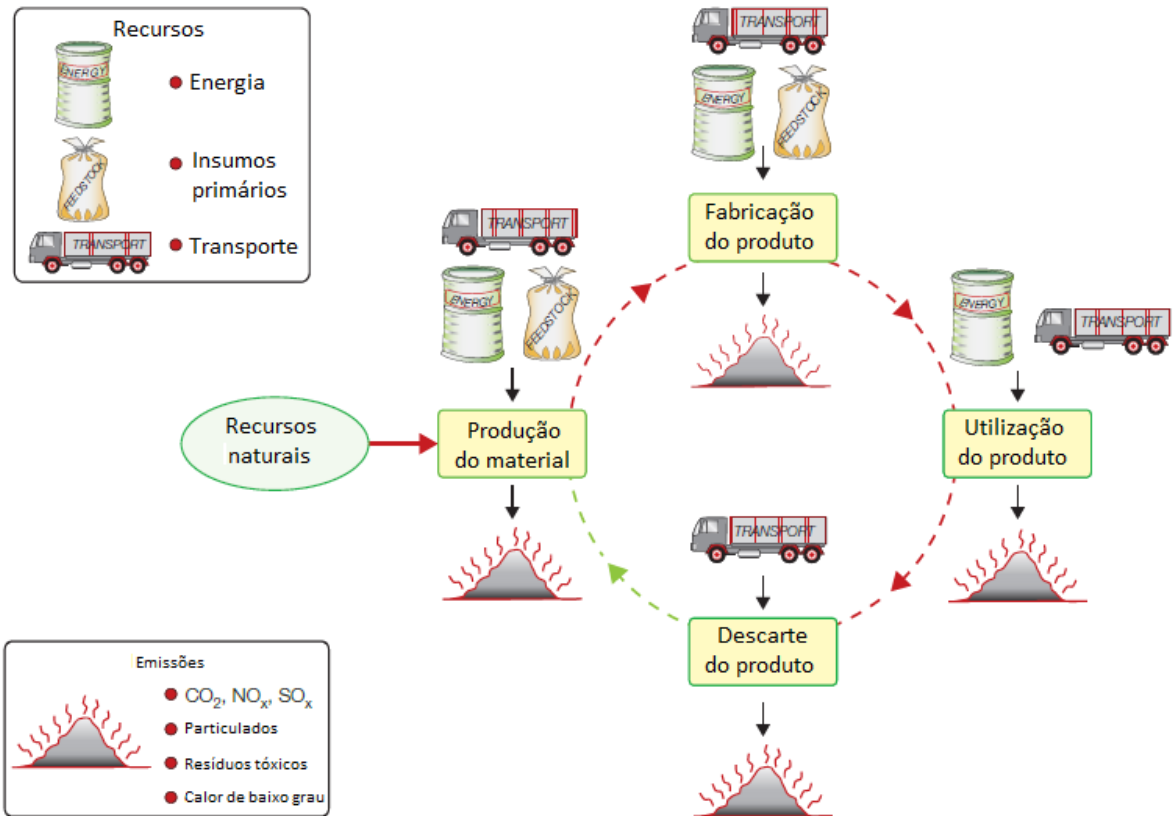


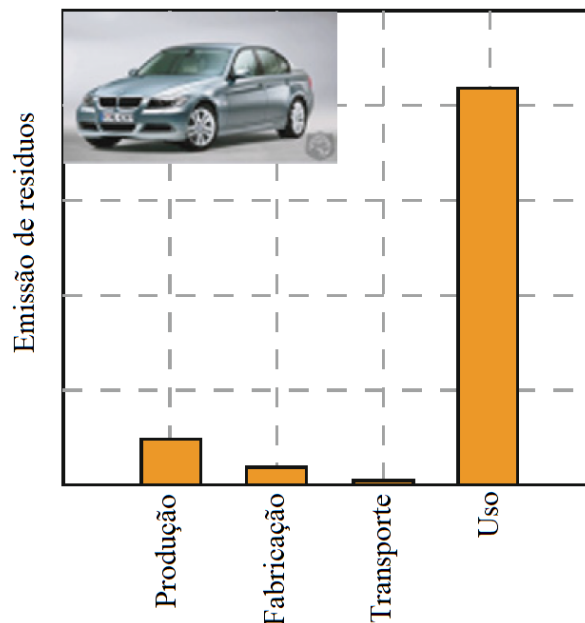
FIGURE 15.1

O ciclo de vida do material. Minérios e insumos primários são extraídos e processados para fornecer um material. Esse é fabricado como um produto que é usado e, ao final de sua vida útil, descartado ou reciclado. Energia e materiais são consumidos em cada fase, gerando resíduo em calor e emissões sólidas, líquidas e gasosas.

Fonte:(ASHBY, 2021)

A Figura 6 atribui as parcelas dos volumes de resíduos gerados ao longo da vida de um automóvel, desde a extração das matérias-primas até a fabricação, uso e disposição final. Como mencionado anteriormente, o descarte do produto pode ocorrer de diversas maneiras, algumas acarretando em uma penalidade em termos de produção de resíduos, outras permitindo a reciclagem ou recuperação de materiais. É comum identificar uma fase de vida que domina a situação, como evidenciado no caso do automóvel conforme ilustrado na Figura 6. No caso dos automóveis, a fase de uso é aquela que produz mais resíduos do que a soma de todas as outras. A fase de descarte não está incluída, pois existem várias opções para cada caso. Uma conclusão clara pode ser extraída da análise da Figura 6: quando uma fase de vida domina a emissão de resíduos, é essa fase dominante que se torna o principal alvo para reprojeto visando a redução das emissões, já que é nessa etapa que uma redução fracionada proporciona a maior contribuição. Mesmo alterações consideráveis nas outras fases resultarão em ganhos praticamente insignificantes (ASHBY, 2021).

Figura 6 – Estimativas aproximadas para a emissão de resíduos em cada etapa do ciclo de vida de um automóvel.



Fonte:(ASHBY, 2021)

Com base na Figura 6, conclui-se que a redução da emissão de resíduos ao longo da vida útil de um automóvel deve ser realizada principalmente durante a fase de uso. Portanto, a estratégia de redução de peso para diminuir o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de gases resultantes da combustão, é a abordagem mais adequada. Dessa forma, a utilização do alumínio na fabricação dos componentes dos automóveis se mostra vantajosa dentro desse contexto.

2.2.3 Os atributos ecológicos das ligas de alumínio

Os atributos ecológicos do alumínio e suas ligas estão associados à sua leveza, durabilidade e capacidade de reciclagem. Essas características fazem do alumínio e suas ligas uma escolha sustentável e ambientalmente favorável em diversas indústrias, incluindo a indústria automotiva.

A leveza do alumínio é um fator essencial na indústria automotiva, tornando-o uma escolha sustentável e favorável ao meio ambiente por diversos motivos. Esse material leve é amplamente utilizado na fabricação de componentes automotivos, como carrocerias, painéis e peças estruturais, contribuindo significativamente para a redução do peso dos veículos. Essa redução de peso resulta em veículos mais eficientes em termos de consumo de combustível, gerando menor emissão de gases poluentes durante sua operação. Além disso, a leveza do alumínio ajuda a melhorar a eficiência energética dos veículos, demandando menos energia para o seu deslocamento. A utilização desse material também contribui para minimizar o impacto ambiental relacionado à extração e processamento de recursos não renováveis, ao mesmo tempo em que sua alta reciclabilidade possibilita a reutilização dos componentes sem perder suas propriedades, reduzindo a necessidade de novas matérias-primas e promovendo a conservação de recursos naturais e energéticos (ALAM MD.T.; ANSARI, 2018).

A durabilidade do alumínio desempenha um papel essencial na indústria automotiva, conferindo-lhe vantagens ambientais significativas. Sua resistência natural à corrosão implica em componentes automotivos com vida útil prolongada, minimizando a necessidade de substituições frequentes e reduzindo a geração de resíduos. Além disso, essa durabilidade contribui para a diminuição da frequência de manutenção dos veículos, resultando em menor desperdício de recursos ao longo do ciclo de vida dos automóveis. Ao empregar o alumínio em componentes estruturais, a vida útil dos veículos pode ser estendida, diminuindo a frequência de descarte e o impacto ambiental associado à produção de novos carros. A capacidade de reciclagem do alumínio ao final de sua vida útil, aliada à sua durabilidade, permite a reutilização dos materiais, reduzindo a demanda por novas matérias-primas e promovendo a conservação de recursos naturais e energéticos (HIRSCH, 2014).

A reciclagem do alumínio é um fator crucial que torna sua utilização na indústria automotiva uma escolha sustentável e favorável ao meio ambiente. Esse processo desempenha um papel fundamental em várias frentes: primeiro, a reciclagem demanda significativamente menos energia em comparação com a produção de alumínio a partir de matérias-primas virgens, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa associadas à produção do material. Em segundo lugar, a reciclagem evita o descarte em aterros sanitários ou incineração, reduzindo os resíduos gerados pela indústria automotiva e preservando o meio ambiente, ao mesmo tempo que diminui a necessidade de novas extrações de matéria-prima, conservando os recursos naturais. Terceiro, a capacidade do alumínio

de ser reciclado repetidamente sem perder suas propriedades físicas permite sua reutilização em novos componentes automotivos, estendendo seu ciclo de vida e reduzindo a demanda por matéria-prima virgem. Por fim, o alumínio reciclado pode ser facilmente incorporado na fabricação de novos produtos, exigindo menos processamento e energia do que a produção a partir de matéria-prima não processada, tornando a indústria automotiva mais eficiente em termos de consumo de energia e recursos. Assim, a reciclagem do alumínio desempenha um papel essencial na redução do consumo de energia, na minimização de resíduos e na conservação de recursos, tornando-o uma opção ambientalmente vantajosa e sustentável na indústria automotiva (ROVEN, 2010).

A reciclagem, é um importante atributo do alumínio e suas ligas. Desde o início da produção comercial, estima-se que aproximadamente três quartos do alumínio primário já produzido ainda estejam em uso. Cerca de um terço dos produtos de alumínio disponíveis no mercado atualmente provém de metal reciclado. Comparada à produção de alumínio primário através da eletrólise de sais fundidos – ainda um dos processos de fundição mais intensivos em energia –, a refusão do alumínio requer muito menos consumo de energia devido ao seu baixo ponto de fusão. Assim, a reciclagem é um pilar fundamental na produção de alumínio, contribuindo para o desempenho do ciclo de vida desse material (HEHL A.; KRUG, 2013).

Na Tabela 5, estão compiladas as principais características ambientais do alumínio e suas ligas, comparadas com as ligas de magnésio, titânio, aços de média liga e aços inoxidáveis. Observa-se que as ligas ferrosas são mais atrativas nesse aspecto, pois possuem menor consumo de energia e produzem menos CO₂ durante seu refinamento e processamento. Ao comparar as ligas de alumínio, magnésio e titânio, nota-se que o alumínio é o mais atraente entre as três opções. é importante ressaltar que todos esses materiais são recicláveis, porém as ligas de alumínio possuem uma cadeia de reciclagem mais estabelecida.

Tabela 5 – Compilação das características ecológicas das ligas de alumínio, ligas de magnésio, ligas de titânio e aços.

Material	Propriedades/características consideradas			
	Energia incorporada (MJ/kg)	Produção de CO ₂ (kg/kg)	É reciclável?	É biodegradável?
Ligas de Al	184 – 203	11,6 – 12,8	Sim	Não
Ligas de Mg	356 – 394	22,4 – 24,8	Sim	Não
Ligas de Ti	855 – 945	53,8 – 59,5	Sim	Não
Aço média liga	31 – 34,3	1,95 – 2,16	Sim	Não
Aço inoxidável	77,2 – 85,3	4,86 – 5,37	Sim	Não

Fonte: Adaptado de (ASHBY, 2021)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais, instrumentos e métodos experimentais utilizados na realização da pesquisa, com o intuito de alcançar os objetivos geral e específicos definidos na seção 1.1.

3.1 MATERIAIS

A Tabela 6 exibe a composição química das ligas de alumínio categorias 3104 e 5052 empregadas nesse estudo, informadas pelo fornecedor do material. As quantidades dos elementos de liga encontram-se nos limites definidos pela *Aluminum Association*. Esses materiais foram adquiridos em formato de chapa laminada a frio, possuindo uma espessura de 2,5 mm.

Tabela 6 – Composição química das ligas de alumínio classes 3104-H34 e 5052-H32

Elemento químico	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Al
AA 5052-H32	2.5	0.23	0.32	0.07	0.07	0.3	0.08	Balanço
AA 3104-H34	1.14	0.1	0.13	0.24	0.93	-	-	Balanço

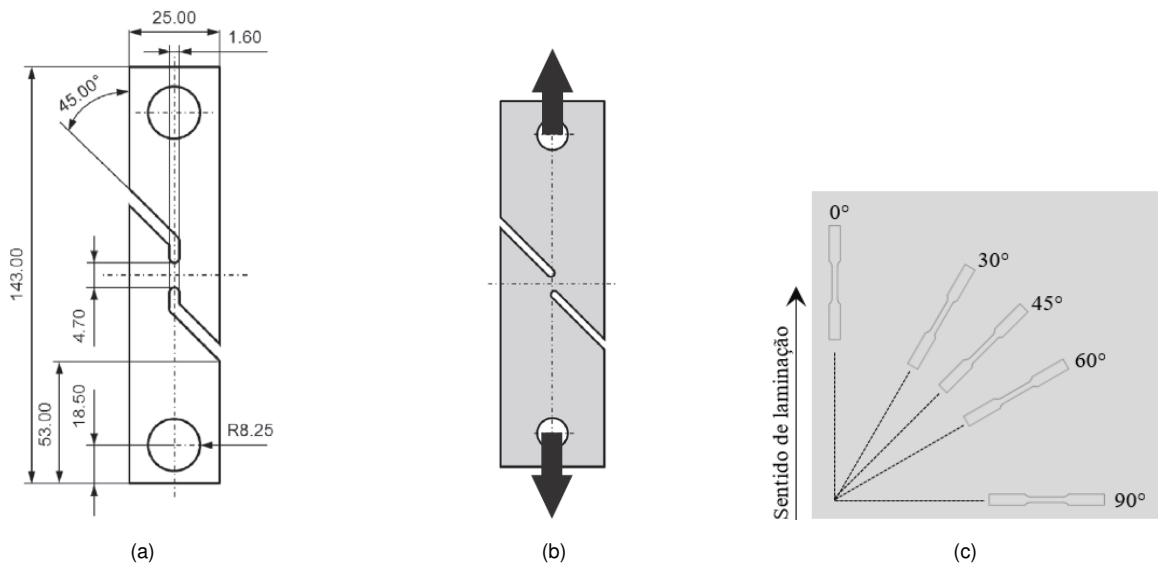
Fonte: (Novelis, 2021)

A liga 5052 apresenta uma condição de endurecimento H32, indicando que, após o processo de endurecimento, o material foi estabilizado em um nível de resistência intermediário entre os estados recozido (O) e parcialmente endurecido (H12). Enquanto isso, a liga 3104 possui um estado de endurecimento H34, o que significa que, após o endurecimento, o material foi estabilizado em um nível de resistência intermediário entre o estado recozido (O) e totalmente endurecido (H19).

3.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os corpos de prova usados nos ensaios de cisalhamento simples foram usinados a laser a partir das chapas comerciais, de acordo com as formas e dimensões apresentadas na Figura 7a. Essa forma de corpos de prova foi desenvolvida por Merklein e Biasutti (2011), baseada no padrão da norma ASTM B831-05 (Figura 7b). Essa configuração foi principalmente proposta para investigar o comportamento de produtos finos de alumínio sob carga de cisalhamento, usando uma zona singular de cisalhamento (YIN et al., 2014). A adaptação da forma dos corpos de prova foi realizada para permitir a mudança na direção da carga, permitindo a avaliação do comportamento do material sob carga de cisalhamento repetitiva e, conseqüentemente, descrever a evolução do endurecimento por deformação plástica (MERKLEIN; BIASUTTI, 2011). Os corpos de prova foram processados em ângulos de 0, 30, 45, 60 e 90° em relação à direção da laminação (Figura 7c).

Figura 7 – Configuração e medidas dos corpos de prova (a) empregados neste estudo e (b) obtidos a partir das normas estabelecidas pela ASTM B831-05. (c) Posicionamento dos corpos de prova em relação à direção de laminação das chapas de alumínio.



Fonte: (a) e (b) (MERKLEIN; BIASUTTI, 2011), (c) (KAPP, 2021)

Destaca-se que o ensaio de cisalhamento planar simples, utilizando uma única zona de cisalhamento, é uma abordagem altamente eficaz para avaliar as propriedades mecânicas de amostras laminadas, com o objetivo de analisar sua anisotropia plástica (RAUCH, 1998). Devido à presença de uma única zona de cisalhamento, é possível investigar minuciosamente a resposta de materiais anisotrópicos. É importante mencionar que, antes dos ensaios de cisalhamento, os corpos de prova passaram por uma etapa de acabamento por ajustagem manual, visando a remoção das rebarbas resultantes do corpo a laser.

Os testes de cisalhamento simples foram conduzidos utilizando uma máquina de ensaio universal EMIC® DL2000, empregando uma taxa de deformação padrão de 0,5

mm/min (o que resulta em uma taxa de deformação $-\dot{\epsilon}$, de cerca de $0,001s^{-1}$), seguindo as diretrizes da norma mencionada anteriormente. As avaliações foram conduzidas a uma temperatura de $21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 54% de umidade relativa, em conformidade com o que é sugerido pela norma. A configuração da máquina de ensaio e a coleta de dados de força e deformação de cisalhamento foram realizadas através do software Tesc Emic instalado em um computador conectado à máquina de ensaio universal. Os corpos de prova foram tracionados uniaxialmente até a ruptura para a obtenção da curva tensão-deformação em cisalhamento. Para cada material e condição testada, pelo menos cinco amostras foram ensaiadas. Os valores de tensão de escoamento por cisalhamento (τ_e) e limite de cisalhamento (τ_c), além da deformação plástica por cisalhamento (γ), foram obtidos conforme as recomendações da norma supracitada.

Figura 8 – Máquina de ensaio universal EMIC DL2000



Fonte: O Autor

3.2.1 DETERMINAÇÃO DA MICROESTRUTURA E DUREZA

Adicionalmente aos corpos de prova destinados aos testes de cisalhamento, foram confeccionadas amostras para conduzir a caracterização microestrutural e a análise de microdureza. A caracterização microestrutural incluiu a avaliação da estrutura utilizando métodos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a identificação das fases presentes através da técnica de difração de raios-X (DRX). As medições de dureza foram realizadas empregando a escala de medida Vickers.

A análise por DRX foi conduzida na configuração Bragg-Brentano ($\theta - 2\theta$), empre-

gando um difratômetro da marca Bruker modelo D8-Advance, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$, com comprimento de onda $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$. O tubo de raios-X do equipamento operou com uma tensão de aceleração de 40 kV e corrente de 20 mA. O intervalo de varredura para a configuração $\theta - 2\theta$ foi entre 20° e 110° , com uma velocidade de varredura de $1\theta/\text{min}$. A identificação das fases presentes foi conduzida utilizando o banco de dados do Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD).

Para investigar a microestrutura, as amostras do material foram embutidas em resina baquelite e, em seguida, passaram por etapas de lixamento e polimento conforme o método estabelecido por Vander Voort e James (1992). Após o preparo metalográfico, as amostras foram limpas em banho de ultrassom com álcool etílico por 10 minutos e secas em ar quente. Para revelar a microestrutura, foi utilizado o reagente Tucker (450 ml de HCl; 150 ml de HNO_3 ; 150 ml de HF e 250 ml de H_2O). A microestrutura foi examinada usando um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL modelo JSM 6360.

Por último, a microdureza Vickers foi avaliada com um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMU-2. Para essas medições, foi aplicada uma carga de 300 gf por um período de 15 segundos. Os resultados expressam a média aritmética simples de cinco leituras realizadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta a análise das características microestruturais e mecânicas das ligas de alumínio investigadas. Os resultados das análises microestruturais, conduzidas por microscopia óptica e difração de raios-X, são discutidos. Essas análises buscam correlacionar os detalhes microscópicos com as propriedades macroscópicas observadas nos ensaios mecânicos. Posteriormente, são apresentados os resultados da análise do comportamento das ligas à tensão-deformação em cisalhamento. A interpretação conjunta desses resultados contribuirá para uma compreensão ampla do impacto das características estruturais das ligas sobre o comportamento mecânico.

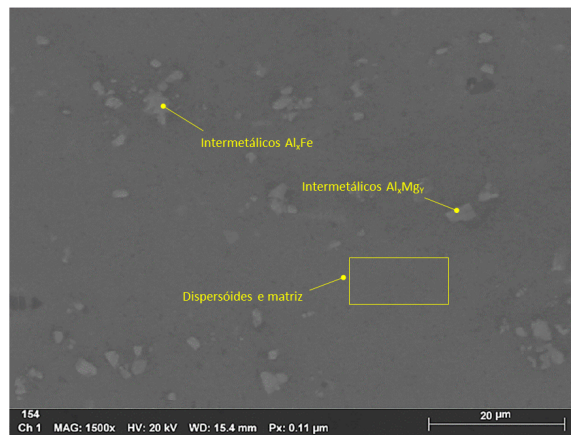
4.1 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

As Figura 9a e Figura 9b apresentam fotomicrografias das superfícies das chapas das ligas de alumínio 5052-H32 e 3104-H34, respectivamente. A análise preliminar revela a presença de compostos intermetálicos ou precipitados de diferentes tamanhos e distribuição não uniforme em ambos os casos. Além disso, observam-se dispersoides finamente distribuídos por toda a matriz das ligas de alumínio.

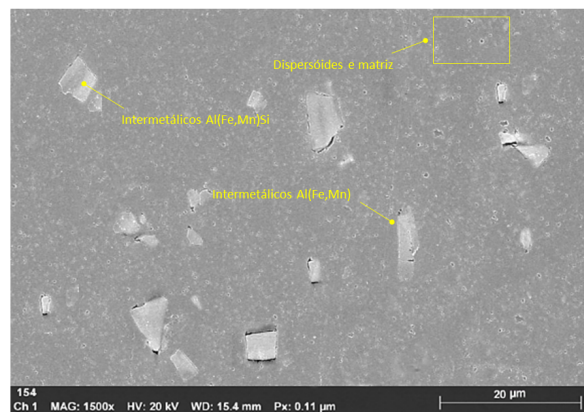
Nas ligas de alumínio da série 5xxx, a fase de equilíbrio na matriz de alumínio é representada pelo intermetálico Al_3Mg_2 (BARBOSA, 2014). Em condições de solidificação fora do equilíbrio, pode-se também formar a fase intermetálica Al_8Mg_5 . Algendy et al. (2020) demonstraram que fases intermetálicas ricas em ferro (Al_6Fe e Al_3Fe) podem precipitar-se em ligas de Al-Mg contendo teores de Mg entre 2-3% em peso e Fe superior a 0,25% em peso (como no caso da liga 5052). Além dessas fases, outros intermetálicos e/ou dispersoides podem estar presentes, resultantes da reação do alumínio com os demais elementos constituintes da liga, como Cr, Mn, Si, Zn, entre outros (GOMES; FILHO, 1987). De acordo com Coutinho (1980), as partículas escuras observadas na micrografia das ligas de Al-Mg correspondem ao intermetálico Al_3Mg_2 , enquanto as partículas sombreadas são referentes ao dispersoide $Al_3(Fe,Mn)$.

Com base na literatura referente à microestrutura das ligas integram dois conjuntos distintos: intermetálicos à base de Fe e à base de Mg. Os intermetálicos à base de Fe provavelmente correspondem ao componente eutético Al_3Fe do sistema Al-Fe. A formação deste precipitado ocorre devido ao teor de Fe da liga (0,32% em peso) ultrapassar o limite de solubilidade do Fe na matriz do Al. Por outro lado, os intermetálicos à base de Mg provavelmente constituem a fase Al_3Mg_2 , a qual forma-se após o limite de solubilidade do Mg na matriz do Al ser atingido (o qual, à temperatura ambiente, se aproxima de 1% em peso, sendo consideravelmente superior ao conteúdo de Mg da liga – 2,5% wt.%).

Figura 9 – Microestrutura na superfície das chapas das ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34.



(a)



(b)

Fonte: O Autor.

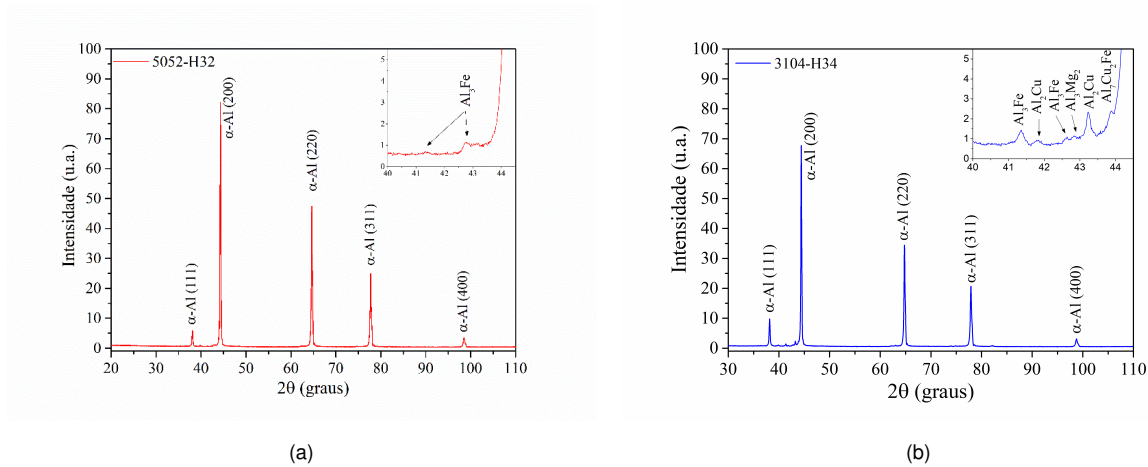
Com base na literatura sobre a microestrutura das ligas de alumínio da série 3xxx, os componentes mostrados na Figura 9b segregam-se em dois conjuntos distintos. Um destes conjuntos é representado pelo intermetálico de estrutura cúbica $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$, enquanto o outro corresponde ao composto ortorrômbico $Al_6(Fe,Mn)$. (YU; BROOKS; GOODRICH, 1993), em sua análise da liga 3104, identificaram esses mesmos compostos intermetálicos. Segundo os referidos autores, a configuração final da microestrutura laminada é influenciada pela composição química da liga, pela taxa de solidificação e pelos perfis de aquecimento utilizados na homogeneização do lingote. A microestrutura inicial resultante da fusão, predominantemente composta pelo intermetálico $Al_6(Fe,Mn)$, é propositalmente modificada durante a etapa de homogeneização para favorecer a predominância do composto $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$. Essa mudança é viabilizada pelo enriquecimento localizado de silício, anteriormente presente na forma de Mg_2Si . O mecanismo de transformação atua por meio da nucleação do intermetálico $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ na interface entre o

composto $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ e a matriz com maior teor de silício (GANDHI, 1999).

Os intermetálicos representados na Figura 9b podem ser distinguidos pela sua morfologia (MARTINS; COUTO; LIMA, 2016). Os dois principais compostos exibem características singulares: um deles apresenta uma tendência de se alongar na direção de laminação, enquanto o outro possui uma estrutura facetada. Supõe-se que essa tendência de alongamento na direção de laminação seja influenciada pela menor dureza do composto $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ em comparação com o intermetálico $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$, resultando no primeiro apresentando uma morfologia mais alongada e o segundo exibindo uma morfologia mais facetada. Por outro lado, os dispersoides são os pequenos pontos mais escuros dispersos por toda a matriz da liga.

Para investigar a presença dos intermetálicos mencionados, realizou-se à análise das fases por meio da técnica de DRX, cujos resultados são apresentados na Figura 10 para as ligas (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34. Com base nas reflexões $\theta - 2\theta$ identificadas nos padrões do ICDD, observa-se a detecção de picos correspondentes aos planos da fase $\alpha\text{-Al}$ e aos precipitados de Al_3Fe . Em relação à fase $\alpha\text{-Al}$, os picos de difração estão associados aos planos (111), (200), (220), (311) e (400) localizados em ângulos de difração $\theta - 2\theta$ de aproximadamente 38° , 45° , 65° , 78° e 98° (Figura 10a), respectivamente. Já os precipitados de Al_3Fe apresentam picos de difração atribuídos aos planos (530) e (444), localizados em ângulos de difração próximos a $41,5^\circ$ e 43° (Figura 10b). Embora não se tenham identificado picos correspondentes aos intermetálicos mencionados nos padrões de DRX, sua presença não pode ser descartada. A baixa concentração do composto pode resultar em uma quantidade insuficiente para gerar sinais de difração detectáveis. Além disso, se o tamanho médio dos compostos for muito pequeno, os sinais de difração podem se tornar demasiadamente fracos para serem registrados. A orientação cristalográfica dos compostos em relação à amostra analisada também pode afetar a detecção, deixando de capturar algumas reflexões características nos padrões de difração.

Figura 10 – Padrões de difração de raios-X obtidos da superfície das chapas das ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34.



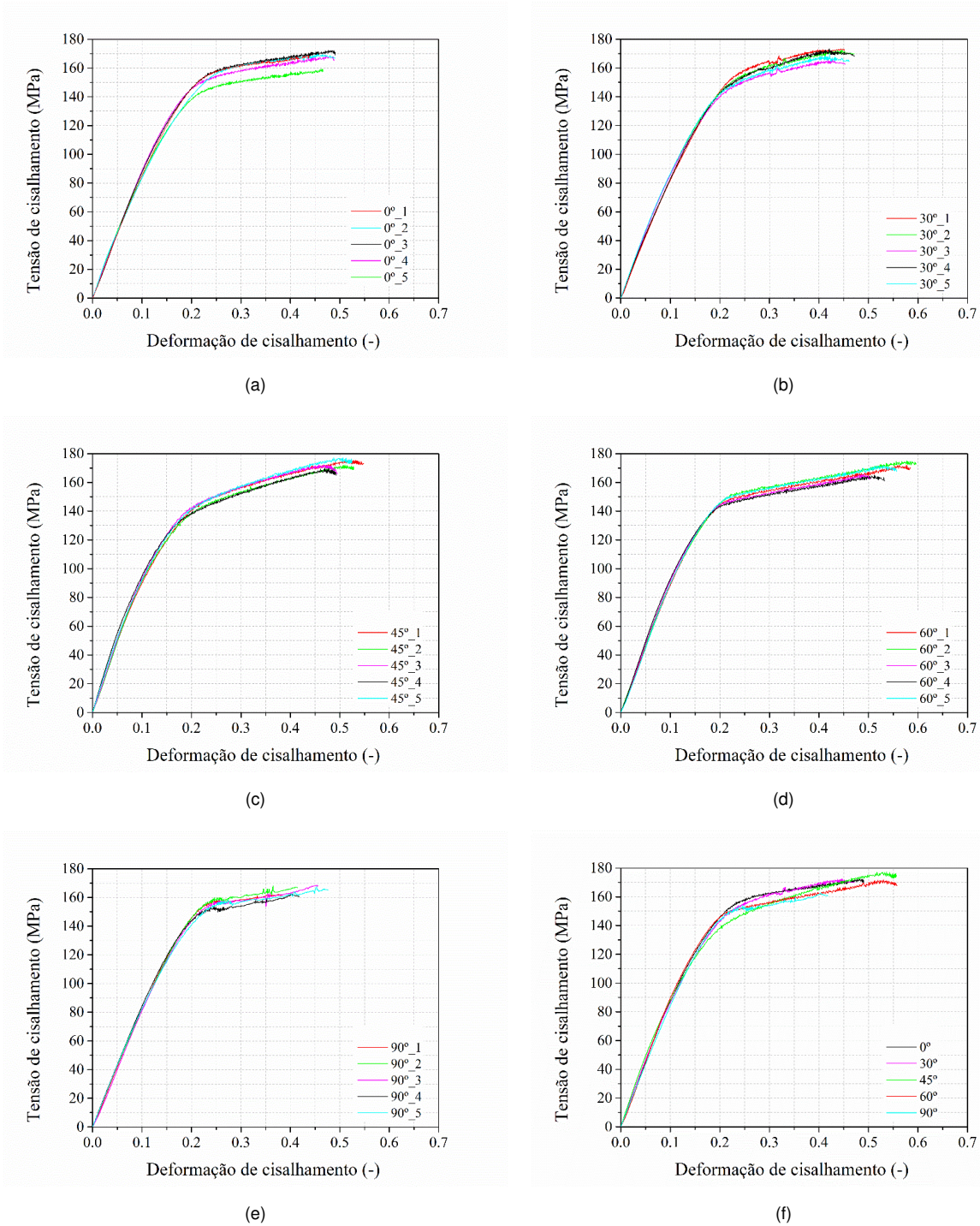
Fonte: O Autor.

4.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO

Nas Figura 11 e Figura 12 exibem as curvas de tensão-deformação em cisalhamento de corpos de prova extraídos em diferentes orientações (0° , 30° , 45° , 60° e 90°) em relação à direção de laminação das chapas de alumínio, classes 5052-H32 e 3104-H34, respectivamente. As Figura 11f e Figura 12f mostram uma análise comparativa entre todas as orientações avaliadas. A análise independente dos dados obtidos, para cada orientação dos corpos de prova em relação à direção de laminação, revela uma variação praticamente insignificante em ambos os materiais, situada abaixo do limite de 15% considerado aceitável (SOUZA, 1982) para a dispersão nos valores das propriedades mecânicas. Como é conhecido, é esperado que ocorram pequenas variações nas curvas devido às heterogeneidades presentes no material.

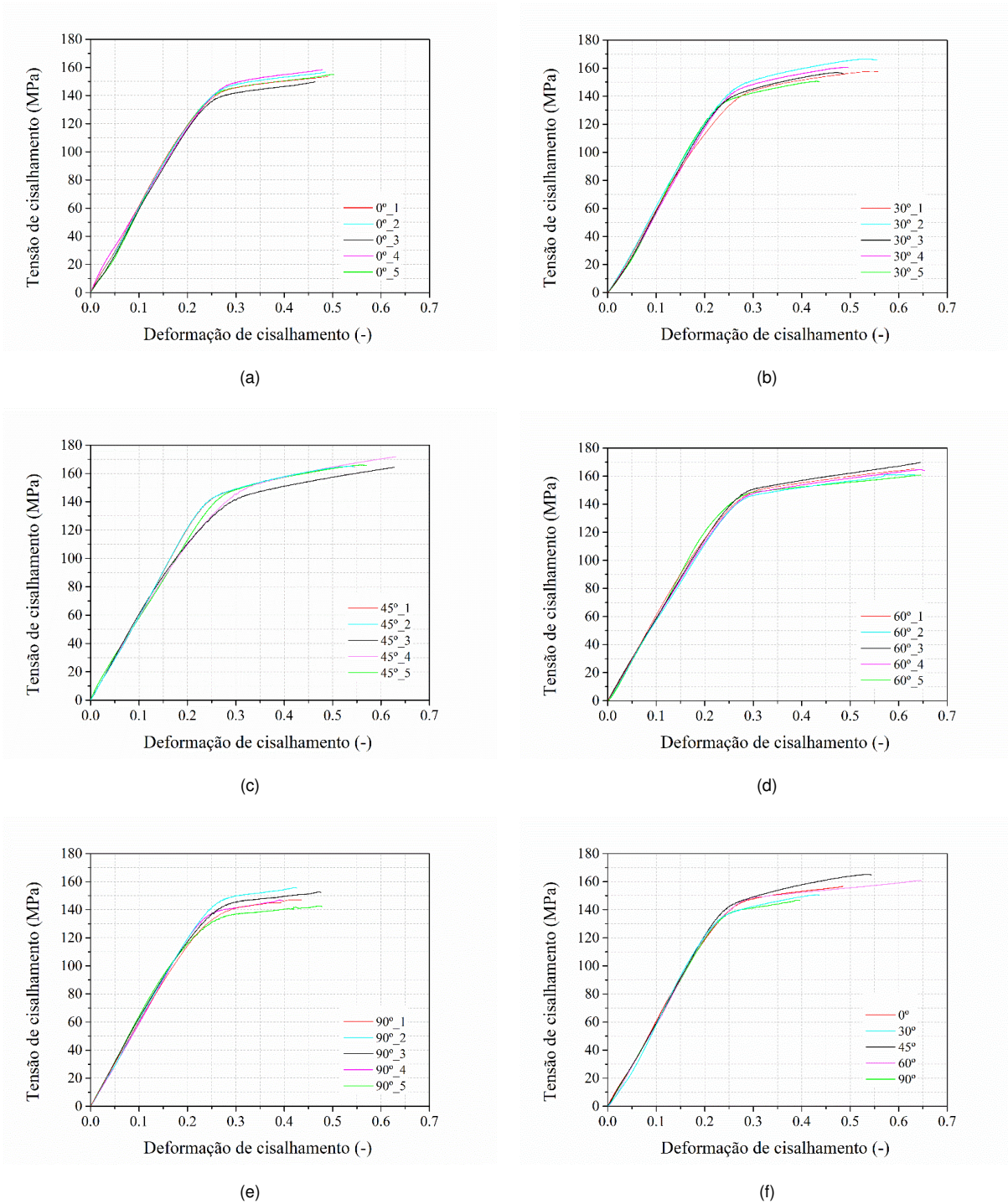
A análise das curvas representadas na Figura 11 revela a manifestação do fenômeno conhecido como efeito Portevin-Le Chatelier (PLC) nas amostras da liga 5052-H32. Esse efeito é caracterizado pelo surgimento de um perfil irregular (serrilhado) na curva de tensão-deformação durante a fase de encruamento uniforme, decorrente de deformações não uniformes nesse estágio. Estudiosos como (H., 2014) e (COTTRELL, 1953) atribuem esse fenômeno à influência dos intermetálicos na movimentação das discordâncias durante a deformação plástica. Como resultado do espaço limitado entre essas partículas, as discordâncias são retidas em sua proximidade, liberando-se apenas quando a tensão aplicada ultrapassa a barreira energética imposta pelos intermetálicos (TIAN et al., 2019). Por outro lado, as amostras da liga 3104-H34 não demonstraram esse comportamento.

Figura 11 – Gráficos demonstrativos das curvas de tensão-deformação em cisalhamento para as amostras usinadas em ângulos de (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° e (e) 90° em relação à orientação de laminação da liga 5052-H32. A figura (f) mostra um comparativo entre as curvas para cada ângulo.



Fonte: O Autor.

Figura 12 – Gráficos demonstrativos das curvas de tensão-deformação em cisalhamento para as amostras usinadas em ângulos de (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60° e (e) 90° em relação à orientação de laminação da liga 3104-H34. A figura (f) mostra um comparativo entre as curvas para cada ângulo.



Fonte: O Autor.

A comparação entre as Figura 11 e Figura 12 revela a inexistência de alterações substanciais no perfil da curva de tensão-deformação em cisalhamento durante a transição do estado elástico para o plástico. Em metais ferrosos como aços de baixo e médio teor de carbono, essa transição é clara e abrupta, enquanto o alumínio e suas ligas apresentam uma transição mais suave entre esses estados. Esse achado está em conformidade com pesquisas anteriores (TIAN et al., 2019);(KRISHNA et al., 2015);(HUSKINS; CAO; RAMESH, 2010) documentadas na literatura especializada.

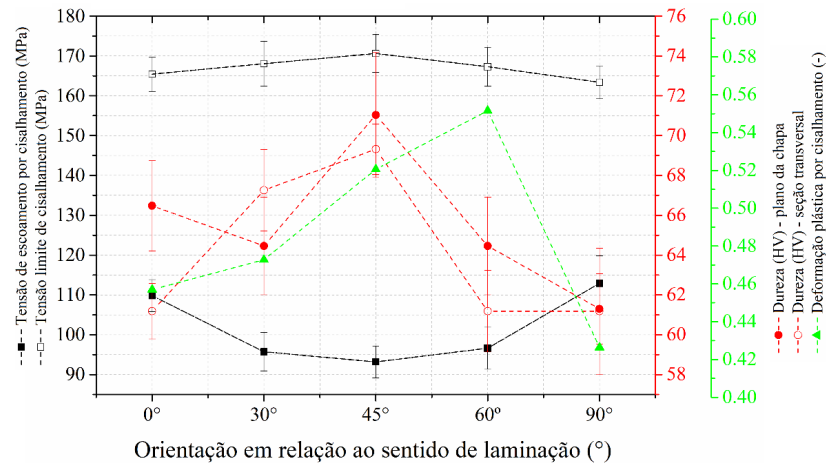
Concentrando a análise na comparação entre as curvas de tensão-deformação exibidas nas Figura 11f e Figura 12f, é possível identificar pequenas variações no comportamento observado entre as condições avaliadas. De acordo com (DIETER, 1981), as propriedades mecânicas em cristais únicos são dependentes das direções cristalográficas. Dessa forma, considerando que a resistência mecânica de um monocristal é altamente anisotrópica, uma deformação plástica intensa que resulte em uma orientação preferencial forte causará a um material policristalino uma anisotropia aproximadamente equivalente à de um monocristal.

Em última análise, percebe-se um comportamento de endurecimento semelhante em ambas as ligas a partir do início da deformação plástica. Além disso, nota-se que os valores mais altos de deformação por cisalhamento foram atingidos em ambas as ligas nos ângulos de 45 e 60°. Conforme mencionado por (PELLEGRINO et al., 2015), nessas situações, pode-se inferir que as deformações primária e secundária no centro da zona de cisalhamento dos corpos de prova são semelhantes nessas orientações. Nestes ângulos, a distribuição dos grãos destes materiais pode ser tal que facilite uma maior deformação plástica. Isso pode ser atribuído à forma como os grãos estão alinhados ou distribuídos nessas direções, permitindo uma movimentação mais suave das discordâncias ou limites de grãos durante a deformação. Além disso, a orientação dos grãos pode ter influência sobre a quantidade de tensões residuais, a eficácia das barreiras para a movimentação das discordâncias, entre outros fatores que afetam a plasticidade do material em diferentes direções (SCHÖN, 2013).

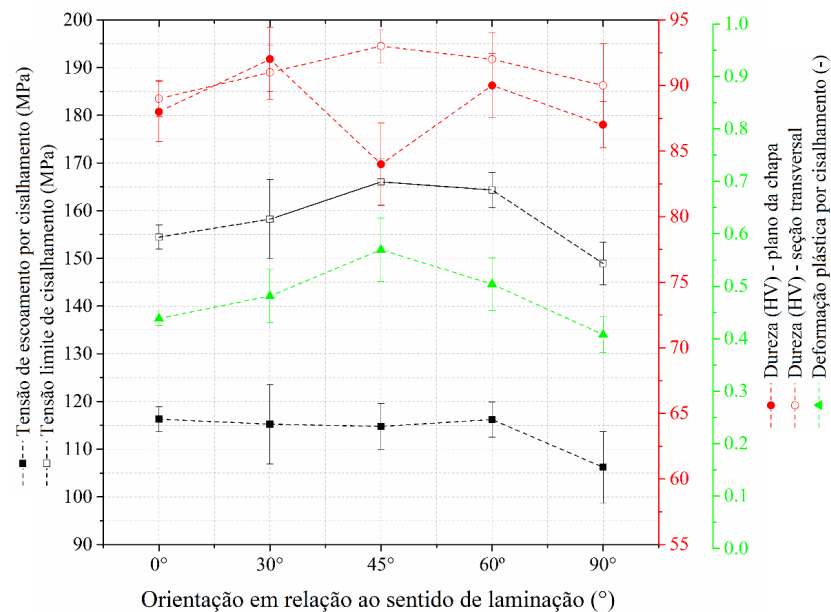
Na Figura 13 são comparados os valores da tensão de escoamento por cisalhamento (τ_e), da tensão limite de cisalhamento (τ_c), da deformação plástica por cisalhamento (γ) e da microdureza Vickers (H) em função da direção da laminação das ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34. Observa-se que o valor de τ_e é mínimo para a orientação de 45° do corpo de prova em relação ao sentido de laminação da chapa para a liga 5052-H32, com um comportamento crescente para as orientações de 0° e 90°. Por outro lado, para a liga 3104-H34, o valor de τ_e não é afetado pela orientação de laminação. Quanto aos valores de τ_c embora os valores médios mostrem um aumento para a orientação de 45° em ambas as ligas, o desvio padrão indica independência desse comportamento em relação à orientação do corpo de prova em relação ao sentido de laminação. Além disso, observa-se que o valor de γ é máximo para a orientação de 60° na liga AA 5052-H32 e de 45° na liga

AA 3104-H34, diminuindo à medida que os ângulos se aproximam de 0° e 90°, em ambos os casos.

Figura 13 – Compilação dos valores da tensão de escoamento por cisalhamento (τ_e), da tensão limite de cisalhamento (τ_c), da deformação plástica por cisalhamento (γ) e da microdureza Vickers (H), em relação à orientação de laminação das ligas de alumínio (a) 5052-H32 e (b) 3104-H34.



(a)



(b)

Fonte: O Autor.

Com base na Figura 13a, é possível afirmar que a liga 5052-H32 apresentará um escoamento a uma menor tensão quando submetida a um cisalhamento simples na direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação. Além disso, os resultados evidenciam uma maior deformação antes da fratura quando os corpos de prova são deformados nas direções de 45° e 60° em relação ao sentido de laminação. A ruptura por cisalhamento ocorrerá sob valores semelhantes das tensões limite em todas as direções de carregamento.

Por outro lado, com base na Figura 13b, pode-se afirmar que a liga 3104-H34 irá escoar e fraturar, em carregamento por cisalhamento simples, mantendo valores semelhantes de tensão de escoamento e tensão limite independentemente da direção de deformação. Entretanto, a deformação antes da fratura será maior quando o carregamento de cisalhamento ocorrer em uma direção de 45° em relação ao sentido de laminação.

Em relação aos valores de dureza, medidos no plano da placa, verifica-se na liga 5052-H32 uma variação no intervalo entre 64 e 71 HV_{0,3}, enquanto na seção transversal os valores variaram entre 61 e 69 HV_{0,3}. No caso da liga 3104-H34, os valores médios de dureza para cada orientação mostraram-se bastante próximos tanto na seção longitudinal quanto na transversal, apresentando variações entre 84 e 92 HV_{0,3} na primeira e entre 89 e 94 HV_{0,3} na segunda. É relevante destacar que os valores medidos são similares aos indicados (70 e 88 HV, respectivamente) para essa liga pela *Aluminium Association*. A diferença de dureza entre a liga 3104 e a liga 5052 é atribuída ao tratamento térmico H34, o qual resulta em uma maior dureza em comparação ao tratamento H32. Conforme mencionado anteriormente na seção 3.1, o tratamento H34 promove uma resistência intermediária entre os estados recozido e totalmente endurecido, enquanto o tratamento H32 produz uma resistência intermediária entre os estados recozido e parcialmente endurecido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A partir da análise e discussão dos resultados obtidos, é possível destacar as seguintes conclusões:

- A microestrutura da liga 5052-H32 apresenta partículas de intermetálicos Al_3Fe e de Al_3Mg_2 , enquanto a microestrutura da liga 3104-H34 contém precipitados de $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ e de $Al_6(Fe,Mn)$, dispersos aleatoriamente em uma matriz de alumínio ($\alpha-Al$).
- A liga 3104-H34 apresenta comportamento de escoamento e fratura sob carregamento por cisalhamento, mantendo constantes os valores de tensão de escoamento e tensão limite, independentemente da direção de deformação. Observa-se uma maior deformação prévia à fratura quando submetida a uma direção de 45° em relação ao seu sentido de laminação.
- A liga 5052-H32 demonstra menor tensão de escoamento ao ser submetida a um carregamento de cisalhamento a 45° em relação ao sentido de laminação. Apresenta maior deformação pré-fratura nas direções de 45° e 60° em relação ao sentido de laminação. A ruptura por cisalhamento ocorre sob valores semelhantes de tensões limite em todas as direções de carregamento.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A execução deste trabalho abriu diversas oportunidades adicionais de investigação dentro do tema, as quais podem ser estudadas afim de aprimorar o conhecimento sobre o assunto. Abaixo, estão enumeradas algumas dessas sugestões:

- Realizar uma investigação mais detalhada da microestrutura das ligas para uma identificação precisa de sua constituição e posterior correlação com o comportamento em cisalhamento sob tração.
- Conduzir análises fractográficas na superfície de fratura das amostras, visando identificar os mecanismos específicos de falha presentes durante os testes de cisalhamento sob tração.

- Explorar os efeitos de diferentes tratamentos usualmente aplicados nas ligas estudadas para verificar seu impacto no comportamento em cisalhamento sob tração.
- Conduzir comparações mais amplas entre diferentes ligas de alumínio para estabelecer relações comparativas e mais detalhadas sobre seu comportamento em cisalhamento sob tração.
- Realizar testes de cisalhamento sob diversas condições, como variação de temperatura e taxa de deformação, a fim de avaliar o impacto desses parâmetros no comportamento das ligas.

REFERÊNCIAS

- ABAL. **Consumo de Alumínio deve Crescer 13% em 2011**. Boston, 2011. Acesso em 28 nov. 2023. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>.
- ALAM MD.T.; ANSARI, A. Review on aluminium and its alloys for automotive applications. **International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science**, Aligarh, v. 5, p. 278–194, 2018.
- ALONSO, H. M. R. Life cycle energy of vehicles on lightweighting and alternative powertrain strategies—a review. **Energy Reports**, v. 8, p. 241–247, 2022.
- ANANDAVEL, S. **Analysis of manufacturing processes according to FMEA techniques and Implementation of IoT systems to prevent process failures**. 2021. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) — Politecnico di Torino, Turim, 2021.
- ASHBY, M. **Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2021.
- ASKELAND, W. W. D. R. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- BADKE, J. B. **Caracterização Experimental da Anisotropia em Chapas de Alumínio da Série 5XXX Classe 5052-H32**. 2021. 76 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- BAE, D. H.; GHOSH, A. K. A planar simple shear test and flow behavior in a superplastic al–mg alloy. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 34, p. 1543–1940, 2003. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-003-0006-3#citeas>>.
- BARBOSA, C. **Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2014.
- BIANCHI, K. et al. Avaliação do desempenho em fadiga das ligas de alumínio 5052h32 e 3104h34. In: SENAFOR, 39., 2019. **Anais eletrônicos**. Porto Alegre, 2019. Acesso em: 07/1/2023. Disponível em: <https://www.2019.senafor.com/conteudo/view?ID_CONTEUDO=405>.
- CALLISTER, D. R. W. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CARVALHO, W. **Influência do teor de chumbo no processamento a quente da liga de alumínio AA3104**. 2000. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2000.
- CHAIMONGKON T.; UTHAISANGSUK, V. Anisotropic fracture forming limit curves of aluminum alloy AA5052-H32 sheet. **AIP Conference Proceedings**, v. 2279, p. 050003, 2020.
- COTTRELL, A. Lxxxvi. a note on the portevin-le chatelier effect. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 44, p. 829–832, 1953.

COUTINHO, T. **Metalografia de não-ferrosos: análise e prática**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

DAVIS, J. R. **Aluminum and Aluminum Alloys (Asm Specialty Handbook)**. 1. ed. Ohio: ASM International, 1993.

DEAN, W. Effects of alloying elements and impurities on properties. **Aluminum: properties and physical metallurgy**, v. 6, p. 200–241, 1990.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

DOBZANŃSKI, L. Synergic effects of the scientific cooperation in the field of materials and manufacturing engineering. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 15, n. 1-2, 2006.

DURSUN T.; SOUTIS, C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. **Materials Design**, v. 56, p. 862–871, 2014.

ETTORE, B. F. **Conformação Plástica Dos Metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

FAOLEX. The directive ec 2000/53 directive on end-of-life vehicles (elv). **Journal of the European Communities**, L269, p. 32–42, 2000.

FILHO, R. A. C.; MARCONDES, P. V. P. True strain distribution profile on sheet metal using different punch geometries. **Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 30, p. 1–6, 2008.

FILLETI, A. As novas aplicações para o alumínio na indústria automotiva. **Materiais automotivos e nanotecnologia**, 2010.

GANDHI, C. **Effect of Homogenization on the Microstructural Development in D.C. Cast AA3104 Aluminum Alloy Used for Can Body Stock**. 1999. 136 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto de Tecnologia da Índia, Kharagpur, 1999.

GOMES, M.; FILHO, B. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. 1. ed. São Paulo: ABM, 1987.

GROOVER, M. P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

H., T. Y. Q. Effect of scandium on the interaction of concurrent precipitation and recrystallization in commercial aa3003 aluminum alloy. **Metall Mater Trans A**, v. 45, p. 1883–1891, 2014.

HEHL A.; KRUG, P. von. Structural materials and processes in transportation. In: _____. **Aluminum and Aluminum Alloys**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. cap. 2, p. 49–112.

HIRSCH, J. Recent development in aluminium for automotive applications. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, China, v. 24, p. 1995–2002, 2014.

HUSKINS, E.; CAO, B.; RAMESH, K. Strengthening mechanisms in an al–mg alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, p. 1292–1298, 2010.

JANICKE, M. Ecological modernisation: new perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 5, p. 557–565, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652607000480>>.

JOVANOVIC, M.; SANGUINO, T. J. M. Driving sustainability: Carbon footprint, 3d printing, and legislation concerning electric and autonomous vehicles. **Sensors**, Basel, Switzerland, v. 23, p. 9104, 2023.

KAPP, R. Z. **Caracterização Experimental da Anisotropia em Chapas de Alumínio da Série 3XXX Classe 3104-H34**. 2021. 53 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

KAUFMAN, J. G. **Fracture Resistance of Aluminum Alloys: Notch Toughness, Tear Resistance, and Fracture Toughness**. [S.l.]: ASM International, 2001.

KEMP, N. J. Life cycle greenhouse gas impacts of a connected and automated suv and van. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 83, p. 102–375, 2020.

KRISHNA, K. et al. Effect of cryorolling on the mechanical properties of aa5083 alloy and the portevin–le chatelier phenomenon. **Materials Design**, v. 67, p. 107–117, 2015.

LAJARIN, S. **Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência**. 2012. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LIU, K. et al. Combining risk assessment, life cycle assessment, and multi-criteria decision analysis to estimate environmental aspects in environmental management system. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 845–862, 2012.

MAGNUSSON, S. The kyoto protocol: Implications of a flawed but important environmental policy. **Canadian Public Policy/Analyse de Politiques**, v. 26, p. 347 – 359, 2000.

MARCONATO, E. A. **Influência de Defeitos nas Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas por FSW da Liga AA6013-T6**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2009.

MARTINS, A.; COUTO, A.; LIMA, N. Study of the deep drawing behavior and crystallographic texture of aa 3104-h19 aluminum alloy sheets. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 230, p. 748–759, 2016.

MAZZOLANI, F. **Aluminium Alloy Structures**. 1. ed. Florida: CRC Press, 1994.

MELLO S. R. C. DE; SOUZA, C. O. D. **Seleção dos Materiais: Alumínio e Suas Ligas**. 1. ed. [S.l.]: Universidade Federal Fluminense, 2009.

MERKLEIN, M.; BIASUTTI, M. Forward and reverse simple shear test experiments for material modeling in forming simulations. **Special Edition: 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011**, Aachen, Alemanha, p. 702–707, 01 2011.

MOURITZ, A. **Introduction to Aerospace Materials**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

Novelis. **Catálogo de ligas de alumínio fornecidas ao segmento automotivo**. 2021. Acesso em 30 nov. 2023. Disponível em: <<https://pt-br.novelis.com/automotive/>>.

PELLEGRINO, S. et al. Modeling of the plastic characteristics of aa6082 for the friction stir welding process. **Key Engineering Materials**, v. 639, p. 309–316, 2015.

RAMALHO R.; LISBOA, C. Uso das ligas de alumínio de alta resistência em substituição dos aços de alta resistência. **Revista Ferramental**, Porto Alegre, v. 1, p. 12–17, 2019.

RAUCH, E. Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests. **Materials Science and Engineering: A**, Berkeley, v. 241, p. 179–183, 1998.

REBOUL, M. C.; BAROUX, B. Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys. **Materials and Corrosion**, v. 62, p. 215–233, 2011.

ROVEN, J. C. H. J. Recycling of automotive aluminum. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 20, p. 2057–2063, 2010.

RUNGE, J. M. A brief history of aluminum and its alloys. In: _____. **The Metallurgy of Anodizing Aluminum: Connecting Science to Practice**. Cham: Springer International Publishing, 2018. cap. 1, p. 1–63.

SALAVERRIA, M. A. Intensive use of aluminium in car body construction. **Proceedings of 12th EAEC European Automotive Congress. Europe in the Second Century of Auto-Mobility**, Bratislava, 2009.

SCHÖN, C. G. **Mecânica dos materiais: Fundamentos e Tecnologia do Comportamento Mecânico**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2013.

SILVA ALV; MEI, P. Costa e. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

SOUZA, S. **Ensaio de Materiais Metálicos**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

TIAN, N. et al. Prediction of the work-hardening exponent for 3104 aluminum sheets with different grain sizes. **Materials**, v. 12, n. 15, 2019.

TOTTEN, G.; MACKENZIE, D. **Handbook of Aluminum Volume 1 – Physical Metallurgy and Processes**. New York: CRC Press, 2003.

WU P.D.; JAIN, M. Evaluation of anisotropic yield functions for aluminum sheets. **International Journal of Plasticity**, v. 19, p. 121–138, 2003.

XU, W. Z. J. Advanced lightweight materials for automobiles: A review. **Materials Design**, p. 110–994, 2022.

YIN, Q. et al. An experimental and numerical investigation of different shear test configurations for sheet metal characterization. **International Journal of Solids and Structures**, v. 51, p. 1066–1074, 2014.

YU, T.; BROOKS, C.; GOODRICH, S. The effect of cold working and annealing practice on earing in 3104 al alloy sheet. **Materials Characterization**, v. 30, p. 251–259, 1993.

NUP: 23081.155552/2023-00

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação
125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

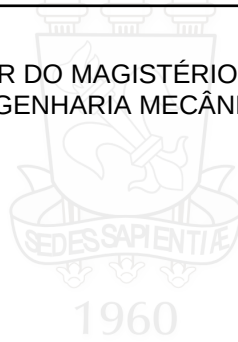
COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
9	TCC	TCC_2023_final_corrigido.pdf

Assinaturas

24/01/2024 20:14:27

CRISTIANO JOSE SCHEUER (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR (Ativo))
07.35.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEM



Código Verificador: 3773170

Código CRC: 6d9d26aa

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

