INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Análise mecânica estrutural e viabilidade econômica na substituição
de aço ARBL (alta resistência baixa liga) pela liga de alumínio 6082 em
quadro de chassi de caminhão**

Versão corrigida
Versão original disponível no IPEN

ANTÔNIO EUSTÁQUIO SIROLI FERREIRA

Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção de
grau de Mestre em Ciências na área de
Tecnologia Nuclear e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antônio
Augusto Couto

SÃO PAULO
2020

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Análise mecânica estrutural e viabilidade econômica na substituição
de aço ARBL (alta resistência baixa liga) pela liga de alumínio 6082 em
quadro de chassi de caminhão**

Versão corrigida

Versão original disponível no IPEN

ANTÔNIO EUSTÁQUIO SIROLI FERREIRA

Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção de
grau de Mestre em Ciências na área de
Tecnologia Nuclear e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antônio
Augusto Couto

SÃO PAULO

2020

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

FERREIRA, Antônio Eustáquio Sirolli

Análise mecânica estrutural e viabilidade econômica na substituição de aço ARBL (alta resistência baixa liga) pela liga de alumínio 6082 em quadro de chassi de caminhão / Antônio Eustáquio Sirolli FERREIRA; orientador Antônio Augusto Couto. -- São Paulo, 2020.

64 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

1. quadro. 2. caminhão . 3. chassi. 4. estrutura. 5. alumínio AA6082. I. Couto, Antônio Augusto, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Antônio Eustáquio Sirolli Ferreira

Título: Análise mecânica estrutural e viabilidade econômica na substituição de aço ARBL (alta resistência baixa liga) pela liga de alumínio 6082 em quadro de chassi de caminhão

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção de grau de Mestre em Ciências na área de Tecnologia Nuclear e Materiais.

Data: 07 / 02 /2020

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Antonio Augusto Couto

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Julgamento:

Prof. Dr.: Jan Vatauvuk

Instituição: Universidade Presbiteriana Mackenzie

Julgamento:

Prof. Dr.: Wilson Carlos da Silva Junior

Instituição: Instituto Federal de São Paulo

Julgamento:

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antonio e Rosíres,
inesquecíveis.

Minha esposa Maria Aparecida e filhos
Anderson e Marcelo, motivadores,
incentivadores e exemplares.

Às minhas irmãs Sonia e Eliane,
guerreiras.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Augusto Couto, pela motivação, estímulo e paciência.

Ao amigo Dr. Arnaldo Augusto Ciquielo Borges, pela indicação ao orientador e estímulo constante na execução e conclusão do estudo.

Aos professores do IPEN com os quais fiz as matérias para acúmulo dos créditos necessários para cumprir as metas estabelecidas.

Aos contatos das empresas ALCOA/ARCONIC/HYDRO, Alfredo Imagawa, Jean Yamamoto, José Sakae Nagatsuyu e Wellington Peleggi, pelo apoio e informações técnicas em geral.

À Mercedes-Benz que foi a fonte primária dos conhecimentos automotivos, em especial ao Dr. Ferdinand Panik, Dr. Uwe Baake, Carlos Hein e Harald Rehder.

Ao Werner Klaus da Maxion e equipe e Dr. Claudio Crivellaro da Metalsa.

Aos membros do Board da FOTON Caminhões do Brasil, Dr. Luiz Carlos Mendonça de Barros, Márcio Vita, Ricardo Mendonça de Barros e especialmente ao Eng. Leandro Lucki Gedanken, pela parceria e apoio ao objetivo desse estudo e ao Darren Lushaoyi da FOTON China.

Também um forte agradecimento à Schwaben Engineering, ao Ricardo Guerra, Márcio Mota, Eduardo Camargo, Francisco Azevedo, Gilberto Patron e Daniel Oliveira, que apoiaram o tema desde de sua concepção.

Ao meu amigo Jair e Elenice, Juliana e Bruno, que foram exemplos de dedicação e determinação para lidarem com desafios.

Ao Sérgio Garrote da Gaiind Indústria e Comércio.

Aos meus filhos Anderson e Marcelo, nos quais fundamentei minha determinação para fazer o Mestrado.

À minha esposa Maria Aparecida, uma estudante exemplar, aplicada e motivadora.

À minha irmã Sonia, mestre em Pedagogia, e motivadora para a realização desse trabalho e compartilhou suas críticas e recomendações, e à Eliane outra irmã lutadora.

E se esqueci de alguém fica registrado o perdão, mas o agradecimento é concedido.

E aos meus pais, Antonio e Rosires, agradecimento eterno.

“A simplicidade é o último grau de
sophistication.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

FERREIRA, Antonio E. S. ***Análise mecânica estrutural e viabilidade econômica na substituição de aços ARBL (Alta Resistência Baixa Liga) pela liga de alumínio 6082 em quadro de chassi de caminhão.*** 2020. 64 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Na fabricação de quadros de chassi de caminhões os materiais predominantes são os aços ARBL (Alta Resistência Baixa Liga), que demandam ferramentais de estampagem de alto custo e complexidade de produção e operação, para se gerar os componentes que irão permitir a formação do quadro do chassi. As vantagens dos aços ARBL são o custo da peça final, resistência e ser de conhecimento amplo no setor de caminhões. O presente estudo visa avaliar um novo material nessa aplicação que é a liga de alumínio 6082, pelo processo de extrusão, o que pode reduzir os custos dos ferramentais bem como adicionar uma vantagem competitiva ao veículo por poder proporcionar maior capacidade de carga útil resultando em maior ganho por operação do veículo.

Palavras-chaves: quadro; caminhão; chassi; estrutura; alumínio AA6082.

ABSTRACT

FERREIRA, Antonio E. S. ***Structural mechanical analysis and economic feasibility in the replacement of HSLA (High Strength Low Alloy) steels by 6082 aluminum alloy in truck chassis frame.*** 2020. 64 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

In the manufacture of truck chassis frames, the predominant materials are HSLA (High Strength Low Alloy) steels, which require high cost stamping tools and production and operation complexity, to generate the components that will allow the formation of the chassis. The advantages of HSLA steels are the final part cost, strength and being well known in the truck industry. The present study aims to evaluate a new material in this application which is the 6082 Aluminum alloy by the extrusion process, which can reduce tooling costs as well as add a competitive advantage to the vehicle by providing greater payload capacity resulting in higher gain per vehicle operation.

Key words: frame, truck, chassis, structure, aluminum AA6082.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Veículo objeto do estudo de introdução de alumínio no quadro do chassi.....	15
Figura 2 - Veículo sem carroceria	16
Figura 3 - Quadro do chassi com seus componentes principais em destaque: longarinas,.....	17
Figura 4 - Airbus A380	19
Figura 5 - Navio com estrutura e superestrutura em alumínio	19
Figura 6 - TGV duplex.....	20
Figura 7 - Capô em alumínio.....	21
Figura 8 - Para-choque em alumínio.....	21
Figura 9 - Evolução da aplicação de alumínio em veículos comerciais	22
Figura 10 - Classificação do Alumínio e suas ligas	33
Figura 11 - Diagrama de fase Al Mg ₂	34
Figura 12 - Curva (S-N) típica de materiais não ferrosos (A) e ferrosos (B)	36
Figura 13 - Composição química aços NBR 6566 (%).....	38
Figura 14 - Propriedades mecânicas dos aços	39
Figura 15 - Veículo em teste funcional durabilidade, destaque ao carregamento.....	42
Figura 16 - Tensão superior à especificada para o material da longarina em aço.....	44
Figura 17 - Definições básicas do quadro em aço e em alumínio.....	47
Figura 18 - Comparativo das deflexões dos quadros em flexão estática	48
Figura 19 - Níveis de tensões em flexão estática.....	49
Figura 17 - Níveis de tensões em flexão estática.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 18 - Níveis de tensões em curvas, região crítica indicada C=206,0.....	50
Figura 19 - Comparativo do deslocamento dos quadros em torção.....	51
Figura 20 - Níveis de tensões em torção	52
Figura 21 - Níveis de tensões em torção, região C=130,3%.....	52
Figura 22 - Níveis de tensões em curvas com espessuras aumentadas em 60%	54
Figura 23 - Quadro do chassi objeto do estudo	55
Figura 24 - Prensa Maxion para estampagem de longarinas de até 12 m.....	56

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução do padrão CAFE para carros de passageiros	27
Tabela 2 - Distribuição de massa percentual típica dos materiais e áreas de aplicação em automóveis.....	29
Tabela 3 - Composição química da liga AA6082 [%]	33
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos materiais aço e alumínio	46

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Advanced High Strength Steel
ALCOA	Aluminum Company of America
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
CAD	Computer Aided Design
CAFE	Corporate Average Fuel Economy
CFC	Estrutura Cúbica de Face Centrada
EPA	Environmental Protection Agency
FEA	Finite Element Analysis
NBR	Normas Brasileiras
VBT	Viner Brasil Tecnologia
VUC	Veículo Urbano de Carga

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1 Materiais aplicados na indústria automotiva.....	24
3.2 Segurança de veículos em alumínio versus aço de alta resistência	25
3.3 Reciclagem dos materiais	25
3.4 Trabalhabilidade de aço e alumínio.....	26
3.5 Cenário de materiais.....	29
3.6 Ligas de alumínio para extrusão	30
3.7 Tratamento T-6 Solubilização e Envelhecimento Artificial ou	32
Endurecimento por Precipitação	32
3.8 Endurecimento por precipitação em ligas de alumínio	34
3.9 Fadiga do alumínio	36
3.10 – Aços ABNT-NBR 6566 – principais características.....	38
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Análise Mecânica Estrutural	44
5.2 Avaliação dos processos produtivos.....	54
5.2.1 Cálculo dos investimentos em ferramentais.....	55
5.2.2 Impacto pela introdução do alumínio no custo variável do produto.....	58
5.3 Vantagens no custo operacional do caminhão	59
6 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O mundo automotivo vem sofrendo uma constante e acelerada modificação quanto às tecnologias embarcadas e novos sistemas veiculares. Um fato é o constante aumento da massa veicular, seja por questões de emissões dos gases de escape, por hibridização, veículos com motor elétrico e a combustão, ou por pura introdução de veículos elétricos movidos por energias armazenadas em baterias, que aumentam essa massa veicular de forma ainda mais substancial. É de conhecimento público o trabalho de pesquisa e desenvolvimento em andamento pelas empresas ALCOA e Metalsa, sendo a ALCOA focada na produção de alumínio e a Metalsa especializada em produção de quadros de caminhões, ônibus e produtos similares. O objetivo dessa pesquisa é substituir o quadro de aço de um caminhão pesado, capacidade de transporte de carga acima de 40 toneladas, por uma liga de alumínio com potencial redução de massa do veículo.

Quanto ao uso de liga de alumínio, o trabalho da ALCOA e Metalsa reforça esse interesse por uma nova tecnologia que possa beneficiar os veículos comerciais, caminhões e ônibus, com as vantagens de redução de massa veicular oferecida pelo alumínio, já que sua densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$ traz muitas vantagens quando comparada com a do aço de $7,8 \text{ g/cm}^3$. Os benefícios potenciais considerados para o quadro em alumínio conforme HALONEN, 2016, são:

- 40% de redução de massa, que representa algo em cerca de 400 kg tomando-se a média dos valores informados por ALCOA/Metalsa
- Desempenho equivalente ao aço uma vez que foi introduzida nova arquitetura que resultou em maior rigidez
- Chassi customizado, ou seja, totalmente dedicado ao veículo
- *Payback* atrativo, pois a carga útil adicional retorna o investimento do projeto
- Resistência a corrosão
- Facilidade de manutenção pelo maior espaço na região do motor

Na figura 1 é apresentada uma imagem do veículo objeto do estudo da substituição de aço por alumínio no quadro do chassi, sendo essa análise inédita,

pois na literatura pesquisada não foi encontrado estudo correlato em caminhões leves.

Historicamente, os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) LNE 380 e LNE 500, ABNT NBR6566, são de uso predominante no componente quadro do chassi dos veículos comerciais em geral, sejam ônibus ou caminhões. Isso se justifica pelo preço atrativo do material bem como a tecnologia de processo produtivo estar totalmente focada no uso do aço, principalmente estampado e em alguns casos usa-se o *roll forming*, que é a conformação do material por roletes sequenciais, mas também de investimento elevado, porém focado em baixos volumes de produção. A seguir são listados alguns exemplos de veículos comerciais, especificamente caminhões, onde existe um potencial para ser utilizado quadro de alumínio:

- Mercedes-Benz, veículo Accelo 1016, material LNE 50 (NBR 6656), que equivale ao LNE 500.
- Volkswagen Caminhões, veículo Delivery 10.160, material LNE 500.
- Ford Caminhões, veículo Cargo 1119, material LNE 600.
- Foton Caminhões, veículo CityTruck 10-16, materiais LNE 380 nas travessas e LNE 500 nas longarinas.

Figura 1 - Veículo objeto do estudo de introdução de alumínio no quadro do chassi

Fonte: Foton Caminhões

Vale ressaltar que existem diversos tipos de carrocerias, como por exemplo: carga seca (normalmente de madeira), baú (normalmente em alumínio) e basculante ou coletora de resíduos (normalmente em aço). O presente trabalho visa avaliar a redução de massa em um caminhão de distribuição urbana, VUC, Veículo Urbano de Carga, com capacidade de carga total de 10 toneladas, no seu componente estrutural de maior solicitação, que é o quadro do chassi. O tipo de caminhão escolhido para o estudo é o de transporte e distribuição de bebidas, onde será avaliado o impacto em resultados econômicos pelo transporte de carga adicional de latas de refrigerantes de 350 ml (massa 350 g/lata). A figura 2 apresenta o veículo objeto dessa análise. Este estudo focará especificamente o quadro do chassi, que tem a função de suportar os agregados mecânicos, elétricos e eletrônicos, e na região da parte traseira da cabine é onde se completa o veículo com sua carroceria específica e posteriormente onde se aloca a carga a ser transportada. A carga mássica projetada no eixo dianteiro é de 3.600 kg e no eixo traseiro de 6.390 kg, totalizando 9.990 kg de carga.

Figura 2 - Veículo sem carroceria com capacidade de carga total de 10 toneladas

Fonte: Foton Caminhões

Na figura 3 é apresentado, como exemplo, o componente quadro do chassi que é o objeto abordado no presente estudo, onde estão destacados dois elementos estruturais vitais: as longarinas e as travessas/terminais. Esses elementos formam algo similar a uma escada, sendo normalmente assim definido no mercado, quadro tipo escada. O objeto desse estudo para um caminhão leve

fica respaldado nas condições anteriormente mencionadas e deve oferecer dados para permitir uma análise criteriosa, tanto técnica como econômica, da aplicação do alumínio produzido por extrusão neste caminhão de uso urbano para distribuição de carga.

Figura 3 - Quadro do chassi com seus componentes principais em destaque: longarinas,

Fonte: ArcelorMittal

O estudo abordará a avaliação do uso de um novo material para esta aplicação: a liga de alumínio AA6082. Esta liga produzida por extrusão é de uso abrangente no mercado por sua resistência estrutural, podendo ser candidata à substituição aos aços ARBL. Este tipo de aço é o material usual nos veículos das principais montadoras de caminhões do Brasil, devido à sua adequação ao processo de estampagem e à elevada resistência estrutural e soldabilidade. Vale destacar que no mercado nacional mais de 90% dos perfis extrudados são de ligas de alumínio da série 6XXX. Dentre as ligas de alumínio da série 6XXX, a que apresenta maiores valores de resistência mecânica é a AA6082. Essa é a razão do presente estudo focar especificamente nesse material. Possui boa soldabilidade, abrasabilidade, resistência à corrosão, conformação e usinabilidade. Essa liga é de grande importância no mercado de perfis extrudados e devido às suas propriedades mecânicas é candidata à utilização em componentes da carroceria e chassis de caminhões para transporte de carga seca (aberta). No Brasil, esta aplicação é tradicionalmente feita em ligas de aço, mas em alguns países já ocorre a introdução de ligas de alumínio na fabricação destes

componentes (principalmente na Europa e Estados Unidos) por razões econômicas, operacionais e ambientais, tais como: redução de massa e consequente aumento na capacidade de carga do veículo; fácil fabricação e reparação, além da reciclagem do material utilizado.

A busca de uma alternativa ao processo de estampagem do aço visa atender um menor custo de investimento e prazo de desenvolvimento, principalmente nos casos de veículos com baixo volume de produção e que tenham um mercado latente demandando um produto específico. Basicamente, em comum com o estudo da ALCOA/Metalsa, que é para caminhão pesado, no estudo para o caminhão leve só existe o material alumínio, uma vez que o conceito estabelecido é o de longarinas, travessas e terminais produzidos pelo processo de extrusão, e para isso as mesmas devem ser totalmente retas, sem *off set*, que é uma variação da seção ao longo do perfil, ou qualquer outra solução que impeça sua produção por esse processo. Ou seja, o conceito do projeto tem que ser adequado ao processo, material e uso operacional do veículo.

O estudo leva em consideração a premissa fundamental de que os mesmos periféricos usados no quadro em aço sejam possíveis de serem utilizados no quadro em alumínio. Essa é uma condição fundamental, assim o uso da liga de alumínio ou aço no veículo é uma questão optativa e não de desenvolvimento de uma solução específica para cada material. Portanto, todos os suportes já validados para uma solução em aço são utilizados para a liga de alumínio. A dinâmica veicular fica assegurada, desde que a rigidez do quadro em liga de alumínio seja próxima da do aço, e é obtida através da adequação estrutural, porém sem variações dimensionais relevantes entre o perfil do quadro em aço e em alumínio.

Vale destacar outros modais de transporte nos quais o alumínio é o material fundamental para a produção desses produtos. Na aviação por exemplo, o alumínio é importante desde de seu nascedouro.

Em 1903, os irmãos Wright fizeram história na aviação quando fizeram o primeiro vôo com propulsão de um motor feito com componentes em alumínio. Atualmente o alumínio é fundamental na indústria aeronáutica. Ele é responsável

por mais de 60% da massa estrutural do Airbus A380, figura 4, e em aviões de curta e média distância o alumínio representa 80% da massa, e não causa faísca.

Figura 4 - Airbus A380

Fonte: European Aluminum Association

Foi na década de 1920 que se iniciou a aplicação de alumínio em embarcações começou a se expandir devido a novas ligas aplicáveis em usos navais. Atualmente 1000 embarcações para passageiros, de alta velocidade, estão em serviço e grande parte possuem a estrutura feita em alumínio. Navios de viagens tem a estrutura e superestrutura normalmente feitas em alumínio, figura 5, enquanto mais da metade dos iates são completamente feitos de alumínio. Essas embarcações exploram as vantagens da baixa densidade e resistência do material, bem como da resistência a corrosão, propriedade indispensável nos ambientes marinhos, e permitiram a construção de navios de cruzeiros com diversos andares.

Figura 5 - Navio com estrutura e superestrutura em alumínio

Fonte: European Aluminum Association

Na década dos anos 80 o alumínio emergiu como o metal escolhido para diminuir os custos operacionais de rodagem e para melhorar a aceleração dos metrô, bondes trens intermunicipais e trens de alta velocidade.

Em 1996 o TGV Duplex, trem de alta velocidade, figura 6, foi introduzido na França, transportando 40% a mais de passageiros e reduzindo em 12% a massa em relação ao trem tradicional, tudo devido a estrutura em alumínio. Atualmente os metrô e bondes em alumínio operam em muitas cidades e trens em alumínio são usados em todo o mundo.

Figura 6 - TGV duplex

Fonte: European Aluminum Association

Em 1899 um pequeno carro esportivo com estrutura em alumínio foi apresentado na feira internacional do automóvel em Berlim. Em 1948 a Land Rover iniciou a montagem de veículos com os painéis externos com chapas em alumínio, exemplo capô na figura 8. Atualmente o Audi A8 tem um uso intensivo de alumínio, assim como um número significativo de carros também usam o alumínio.

A média do uso de alumínio em carros de passeio já atingia aproximadamente 131 kg em 2005. No mesmo ano um em cada quatro carro produzido na Europa tinha capô em alumínio, e aproximadamente um terço dos carros europeus já eram equipados com para-choques com sistema em alumínio.

Figura 7 - Capô em alumínio

Fonte: European Aluminum Association

Figura 8 - Para-choque em alumínio

Fonte: European Aluminum Association

A apresentação do alumínio em veículos comerciais ocorreu em ônibus em Paris em 1910, figura 9, e o alumínio foi usado em uma variedade de elementos em veículos comerciais nos anos 30. Os anos 50 viram os primeiros tanques, vans e caminhões basculantes em alumínio. Atualmente grande parte dos tanques carretas silo são feitas totalmente em alumínio. Considerando a frota europeia atual o alumínio contribui com a redução em aproximadamente de 800 kg por composição caminhão trator.

Figura 9 - Evolução da aplicação de alumínio em veículos comerciais

Fonte: European Aluminum Association

Como visto, o alumínio vem se inserindo em praticamente todos os meios de transporte de carga ou passageiros, fato que deverá continuar principalmente observando-se a possibilidade de melhoria do custo operacional pela maior carga ou passageiros transportados.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do estudo é o de se avaliar técnica e economicamente a modificação do quadro do chassi de caminhão urbano de aço ARBL pela liga de alumínio AA6082 obtida por extrusão. O material alternativo que está sendo considerado é uma liga disponível no mercado e de uso em componentes estruturais, carrocerias, embarcações e peças automotivas.

Na avaliação técnica serão comparadas as resistências da estrutura de alumínio com a do aço por meio de métodos de elementos finitos. A análise por métodos de elementos finitos no quadro de aço será comparada com testes de rodagem e extrapolada para o caso de quadro da liga de alumínio. Vale destacar que será assumido que os perfis dos componentes do quadro são idênticos, só o material será substituído para se obter uma avaliação que permita a comparação.

Uma avaliação específica deve ser efetuada para se comparar os investimentos em ferramentais necessários para cada alternativa, aço x liga de alumínio, considerando os processos de produção estampado para o aço e por extrusão para a liga de alumínio. O processo de montagem do quadro serão os mesmos para ambos os casos.

O impacto do ganho de capacidade de carga paga (*payload*) a ser considerado factível, será transformado e projetado em termos de valor futuro, considerando-se uma vida útil do veículo de 5 anos. Os benefícios econômicos são avaliados com base em uma aplicação real de veículo para transporte de refrigerantes em lata, com o potencial ganho de carga pela aplicação da liga de alumínio, avaliando-se seu impacto no custo operacional do caminhão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão abordados os tópicos ligas de alumínio para extrusão, endurecimento por precipitação de ligas de alumínio.

3.1 Materiais aplicados na indústria automotiva

Desde a invenção do automóvel, inúmeros materiais foram utilizados em sua aplicação estrutural, tais como, ligas ferrosas, de aço e outros metais, plásticos, compósitos e até mesmo madeira. Recentemente, o alumínio tem aparecido cada vez mais nas notícias da indústria automotiva, sendo considerado o material de escolha para veículos avançados da próxima geração, de elétricos a picapes.

A seleção de materiais está se tornando cada vez mais uma consideração para compradores de carros e construtores a identificação destes materiais passa a ser mais rigorosa e técnica, visando identificar qual de fato apresentará as melhores características necessárias ao projeto.

Na tabela periódica, o alumínio é cerca de um terço da densidade do aço. Mas ser mais leve nesse sentido literal traduz-se em peso leve dos veículos?

A indústria do alumínio diz que sim, apontando para as montadoras como Tesla e Ford que escolherem o alumínio como redução de massa para compensar a massa extra das baterias ou propor aumento da carga útil. A estrutura superior e o chassi perfazem mais da metade da massa do veículo médio, de modo que o material pode fazer uma grande diferença na massa, na rigidez e na resistência do veículo. A resistência à tração do aço é de até 2.000 MPa, que é cerca de quatro vezes superior às ligas de alumínio mais resistentes disponíveis atualmente.

Essa diferença de resistência à tração significa que as peças de alumínio precisam aumentar a espessura para atender aos padrões de segurança, enquanto que o aço avançado de alta resistência (AHSS) pode ser mais fino, reduzindo assim a massa. Contudo, essas peças de alumínio mais espessas ainda podem sair mais leves do que suas contrapartes de aço.

Foi avaliada a possibilidade de substituir materiais ferrosos por ligas de alumínio na estrutura de eixos traseiros de veículos comerciais através de uma análise por elementos finitos como uma etapa da validação de um novo produto. Os resultados do estudo mostram que é possível usar o alumínio na estrutura de eixos de veículos comerciais com significativa redução de massa. Na comparação estudada entre um eixo em ferro fundido e um eixo em alumínio para fundição obteve-se uma redução de massa de 20% (SAITO, K. S).

3.2 Segurança de veículos em alumínio versus aço de alta resistência

De acordo com o site drivealuminum.org, os veículos com corpo de alumínio são mais seguros que os de aço graças à melhor absorção de energia, maiores zonas de esmagamento que se dobram de forma mais previsível e com maior tamanho geral.

Um contraponto interessante para essas vantagens: não é o material que importa tanto quanto o design do material.

Você pode projetar um veículo seguro com outros materiais, mas é uma combinação de materiais e *design*. É absolutamente cientificamente incorreto dizer que o alumínio, como material, é mais seguro.

3.3 Reciclagem dos materiais

A reciclagem de alumínio se confunde com a implantação da indústria do metal no país. Na década de 1920, data dos primeiros registros de produção de utensílios de alumínio em território nacional, o setor utilizava como matéria prima a sucata importada de vários países. Nos anos 1990, com o início da produção das latas no Brasil, a reciclagem do metal foi intensificada, registrando volumes cada vez maiores. Hoje a reciclagem de alumínio no Brasil funciona com altíssimos índices de eficácia, acima da média mundial, reciclando praticamente toda sucata disponível. A relação entre este volume e o consumo doméstico de alumínio indica um percentual de 38,5%, que é superior à média mundial de 27,1% (base 2014). Em 2015, o país reciclou 602 mil toneladas de alumínio.

Desse total, 292,5 mil toneladas referem-se à sucata de latas de alumínio para bebidas, o que corresponde a 97,9% do total de embalagens consumidas em 2015, índice que mantém o Brasil entre os países líderes em reciclagem de latinhas desde 2001 (ABAL, 2020).

O aço figura entre os materiais mais recicláveis e reciclados do mundo. O setor estimula a coleta e recicla o aço contido nos produtos no final da vida útil, empregando-o na fabricação de novos produtos siderúrgicos, sem qualquer perda de qualidade. Dessa forma, a produção de aço a partir de sucata reduz o consumo de matérias-primas não renováveis, economiza energia e evita a necessidade de ocupação de áreas para o descarte de produtos em obsolescência (IAB, 2020).

3.4 Trabalhabilidade de aço e alumínio

Enquanto algumas ligas de AHSS podem ser desafiadoras para trabalhar, o aço é amplamente conhecido por maior rendimento e ductilidade do que as ligas de alumínio. Uma característica pode ser apontada para uma diferença de projeto que poderia fazer a escolha de certos fabricantes entre alumínio e aço:

O design do corpo do Cadillac, por exemplo, não seria possível com o alumínio, devido à menor ductilidade do material. O alumínio tem menor alongamento, o que é uma indicação de formabilidade.

As novas ligas AHSS têm propriedades diferentes das de 20 a 30 anos atrás.

A indústria do aço continua inovando. Na década de 1970, começamos com cerca de sete graus de aço (tipos de ligas). Nas últimas décadas, esse número aumentou para mais de 200 graus.

Estas novas classes de aço foram desenvolvidas pelos fornecedores para fornecer a redução de massa que as montadoras precisam para competir sob as diretrizes de economia de combustível cada vez mais rigorosas. As montadoras estão espremidas de ambos os lados, com diretrizes de eficiência exigindo veículos mais leves e diretrizes de segurança que pressionam por veículos mais fortes e rígidos. Isso poderia explicar o recente aumento do alumínio, que pode

atender a esses requisitos, mas também colocou um desafio à indústria do aço para criar ligas que possam competir e superar os outros materiais.

Na batalha para reduzir a massa do veículo ou aumentar o desempenho, as montadoras optam por materiais alternativos e novas tecnologias. Mas assim que atingir a redução de massa necessária, o próximo passo é reduzir o custo.

O Chevy Silverado é um caso de uso lógico para o alumínio. Painéis articulados são não-estruturais, então eles são uma boa opção para a redução em massa se a absorção do custo for possível (ISAAC, 2016).

Com a crescente demanda por melhoria da economia de combustível e controle de emissões, há um grande interesse em encontrar soluções alternativas para a produção de veículos mais leves, através da substituição de materiais, modificação de projeto e fabricação eficiente. Os materiais disponíveis hoje incluem aços de alta resistência, ligas leves, como ligas de alumínio e magnésio, e uma variedade de compósitos.

A melhoria da economia de combustível e o controle de emissões são os dois desafios mais importantes que a indústria automotiva enfrenta atualmente. Nos EUA, a economia média de combustível é regulada pelo padrão CAFE (Corporate Average Fuel Economy), que é uma economia média ponderada de combustível (expressa em milhas por galão norte-americano ou mpg, 1 mpg = 0,43 km / litro) da frota de veículos de passageiros ou caminhões leves de um fabricante de veículos. Para carros de passageiros, o padrão CAFE aumentou, vide tabela1.

Tabela 1 - Evolução do padrão CAFE para carros de passageiros

18,0 mpg	1978	para
27,5 mpg	atualmente	e
35,0 mpg	2020	-

Fonte: o autor deste trabalho

Os padrões de economia de combustível em outros países são direta ou indiretamente regulados por seus governos ou mantidos voluntariamente pelas montadoras. Esses padrões são diferentes do padrão americano e muitos deles são muito mais rigorosos, mas todos têm os mesmos objetivos de melhorar a

eficiência de combustível e reduzir a poluição ambiental e a emissão de CO₂, a principal causa do efeito estufa.

A economia de combustível de um veículo é medida usando um ciclo de direção específico (o ciclo de direção da EPA – Environmental Protection Agency) nos Estados Unidos, e depende de muitos fatores, que incluem requisitos de potência do veículo, velocidade do veículo, eficiência do motor e transmissão e tipo de combustível. O requisito de potência do veículo é a soma dos requisitos de potência para aceleração do veículo, condução em um grau, superando a resistência ao rolamento na interface pneu-estrada, superando a resistência aerodinâmica e operando os acessórios, como condicionador de ar, aquecedores e módulos de entretenimento. Os primeiros três desses requisitos de energia são diretamente proporcionais à massa do veículo (MALLICK, 2010).

Assim, reduzir a massa do veículo pode causar uma redução significativa na necessidade de potência do veículo e, conseqüentemente, aumentar a economia de combustível. O arrasto aerodinâmico, o coeficiente de resistência ao rolamento do pneu e a necessidade de alimentação auxiliar têm efeitos muito menores na economia de combustível. Estudos têm mostrado que cada redução de 10% no peso do veículo pode resultar em 5 a 8% de maior eficiência de combustível (BROOKE e EVANS, 2009). Em termos de efeito estufa, a redução do peso do veículo em 100 kg resulta em redução de CO₂ de até 12,5 g/km.

Além do benefício primário na economia de combustível, a economia de massa tem vários benefícios secundários. Por exemplo, quando a massa do veículo é reduzida, a potência necessária para aceleração e frenagem também é reduzida, o que cria uma oportunidade para projetar sistemas menores de motor, transmissão e freios. Do ponto de vista da dinâmica do veículo, a redução da massa do veículo não afeta sua estabilidade e controle. Por outro lado, a redução de massa em componentes selecionados pode ser utilizada para equalizar a distribuição de massa do veículo entre os eixos e reduzir o centro de gravidade do veículo, sendo que ambos melhoram sua dinâmica e controle.. Dois atributos do veículo que podem ser afetados negativamente pela redução de massa do veículo são o conforto e a segurança da viagem. No entanto, eles também são influenciados pelo design do veículo e seleção de materiais.

Historicamente, a redução de massa do veículo começou nos EUA na década de 1970, quando os fabricantes de veículos começaram a reduzir o tamanho de seus veículos para atender à exigência do CAFE de 1978 de 18 mpg. O *downsizing* foi conseguido principalmente pela introdução de carros com distâncias entre eixos menores e pela mudança de estruturas chassi-carroceria para estruturas monobloco ou *body-in-white* (BIW) (MALLICK, 2010).

3.5 Cenário de materiais

O aço de baixo carbono e o ferro fundido eram os materiais mais utilizados na indústria automotiva antes dos anos 70. Como a tabela 1 indica, até hoje o aço é usado em quantidades muito maiores do que qualquer outro material, embora em vez de apenas aços com baixo teor de carbono, haja agora uma mistura de aços de baixo carbono e aços de alta resistência. No entanto, com maior ênfase na redução de massa do veículo, o cenário de materiais está mudando rapidamente para incluir outros materiais, como ligas de alumínio, ligas de magnésio e compósitos de matriz polimérica (POWERS, 2000).

A maior oportunidade para redução de massa de componentes está na carroceria e componentes do chassi, que compreendem 60% da massa de um veículo. Muitos novos materiais e processos de fabricação foram desenvolvidos nos últimos 20 anos para diminuir a massa da estrutura da carroceria e painéis, chapas de revestimento e portas, além de componentes de suspensão. A massa do trem de força, que inclui tanto o motor quanto a transmissão, está entre 25 e 30% da massa do veículo. Vários novos materiais e desenvolvimentos de processos de fabricação também ocorreram para reduzir a massa do trem de força.

Tabela 2 - Distribuição de massa percentual típica dos materiais e áreas de aplicação em automóveis

Aço	55	Estrutura da carroceria, painéis, motor e componentes da transmissão e suspensão e <i>driveline</i>
-----	----	---

Ferro fundido	9	Componentes do motor, freios e suspensão
Alumínio	8.5	Bloco do motor e rodas
Cobre	1.5	Chicotes e componentes elétricos
Polímeros	9	Acabamento interno, componentes elétricos e compósitos poliméricos eletrônicos, linha de combustível
Elastômeros	4	Pneus, acabamentos e juntas
Glass	3	Vidros
Outros	10	<i>Carpes</i> , fluídos, lubrificantes, etc.

Fonte: o autor deste trabalho

Dados mais recentes, HOVERUN et al, 2017, mostram que mais da metade do volume total na produção de um automóvel moderno consiste em peças de ferro fundido e aço (55%), cerca de 11% - plásticos, 9% ligas de alumínio; 7% correspondem a borracha e 3% a vidros; a quota de ligas não ferrosas (magnésio, titânio, cobre e zinco) não excede 1%; outros materiais (vernizes, tintas, fios elétricos, materiais de revestimento, etc.) perfazem 13,5%, convergindo para os dados da tabela anterior.

3.6 Ligas de alumínio para extrusão

O alumínio comercialmente puro tem uma resistência à tração relativamente baixa, contudo, com a conformação mecânica a frio a resistência do metal pode ser praticamente dobrada. Aumentos maiores podem ser obtidos com pequenas adições de elementos de liga, tais como: silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco, ferro, entre outras, além da realização de tratamentos térmicos.

Extrusão é um processo de transformação termomecânico em que um tarugo de metal é reduzido em sua seção transversal quando forçado a fluir através de uma matriz sob o efeito de altas pressões e temperatura. Em vista das

grandes forças envolvidas, a maior parte dos metais é extrudada a quente, propiciando o aumento de sua capacidade elástica e de sua ductibilidade, reduzindo a resistência à deformação. A utilização de perfis extrudados de alumínio praticamente iniciou-se na Segunda Guerra Mundial em componentes aeronáuticos. Atualmente, sistemas de fachadas, componentes de carrocerias de ônibus e caminhões, portas e janelas, estruturas aeroespaciais e centenas de outros itens são fabricados a partir de perfis extrudados de alumínio e suas ligas (ABAL, 2005 A; ASM, 1998).

O processo de extrusão é o que oferece maior versatilidade no desenvolvimento de produtos, quando se trata de projetar peças que tenham uma seção transversal constante. A fabricação de componentes que requer o encaixe de várias peças pode ser simplificada utilizando um único perfil extrudado.

A variedade de perfis que pode ser extrudada em alumínio é praticamente ilimitada.

As vantagens dessas características incluem a redução de custos, por meio da eliminação de operações posteriores de usinagem ou junção, bem como a possibilidade de obtenção de seções bem mais resistentes por meio de adequada eliminação de juntas frágeis e de uma melhor distribuição de metal. Embora qualquer liga trabalhável de alumínio possa ser extrudada, existem aquelas que oferecem uma ampla faixa de propriedades e que podem ser processadas com a máxima eficiência.

Para a identificação do alumínio e suas ligas trabalháveis a Aluminium Association utiliza um sistema de classificação numérico de quatro dígitos, sendo que:

- O primeiro dígito classifica a liga pela série segundo o principal elemento adicionado e indica o grupo de ligas, conforme especificado na tabela 2;
- O segundo dígito indica modificações na liga original ou dos limites de impureza;
- Os dois últimos dígitos identificam a liga de alumínio para as séries 2XXX até 8XXX ou indicam a pureza do alumínio para a série 1XXX.

Nas ligas da série 6XXX o Mg e o Si são os elementos mais importantes e respondem pela formação do intermetálico Mg_2Si . Este composto, quando adequadamente formado e disposto na matriz é responsável pelo aumento da resistência mecânica da liga, BORGES, 2017.

Conforme dados dos fabricantes – ALCOA e VBT (Viner Brasil Tecnologia) a liga 6082 possui alta resistência mecânica, resistência à fadiga, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa usinabilidade, boa soldabilidade e fácil anodização, indicadas para aplicações em estruturas, carrocerias, embarcações, peças aeronáuticas e moldes de sopro; sendo que a com tratamento T6, possui resistência à tração de 310 MPa (N/mm²) e limite de escoamento à tração de 260 MPa (N/mm²), material produzido pela ALCOA.

3.7 Tratamento T-6 Solubilização e Envelhecimento Artificial ou Endurecimento por Precipitação

A solubilização consiste em aquecer o alumínio a uma temperatura bem elevada, cerca de 560 °C próxima do ponto de fusão, 660 °C, de uma maneira que nesta temperatura, com os coeficientes de difusão dos elementos de liga no alumínio já suficientemente aumentados, seja possível a migração desses átomos, proporcionando a dissolução, completa depois de certo tempo de permanência nesta temperatura, 30 min a 5,0 h, das fases secundárias inicialmente presentes na liga.

Esta etapa do tratamento térmico é fundamental para assegurar que o envelhecimento subsequente, realizado em temperatura bem mais baixa e tempo mais prolongado, ocorram de modo controlado, de tal maneira que os precipitados sejam formados de forma controlada, principalmente no que se refere ao tamanho dos mesmos.

Quando é feito um resfriamento rápido em água, mantém-se à temperatura ambiente a solução sólida supersaturada. Posteriormente, a manutenção do material à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou a uma temperatura mais elevada (envelhecimento artificial) leva à formação de precipitados

endurecedores. No envelhecimento natural a cinética de precipitação é mais lenta do que no envelhecimento artificial, no qual o controle de temperatura e tempo permite a obtenção de valores de dureza mais elevados.

No envelhecimento artificial é possível atingir o máximo de dureza para um determinado tempo de tratamento, após o qual o crescimento excessivo dos precipitados e a consequente perda de coerência dos mesmos com a matriz leva à queda de dureza denominada super envelhecimento. O tratamento de solubilização e envelhecimento (T6) só dá resultado nas chamadas ligas termicamente tratáveis, que podem apresentar aumento de dureza mediante tratamento térmico (ALUTRAT, 2019).

Na Figura 10 é apresentada a tabela com um resumo da classificação das ligas de alumínio e seus compostos principais.

Figura 10 - Classificação do Alumínio e suas ligas

ALUMÍNIO E SUAS LIGAS - TRABALHAVEIS	
Designação da série	Indicação da composição
1XXX	99,00% mín. de alumínio
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: ABAL, 2005 A; ASM 1998.

Na tabela 3 são apresentados os principais elementos da liga 6082, com destaque para o alto teor de Magnésio e Silício, característicos desse material.

Tabela 3 - Composição química da liga AA6082 [%]

Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	Mn	Si	Ti	Zn	Outros
0,04-			0,6-		0,4-	0,7-			
0,15	0,1	≤ 0,50	1,20	-	1,00	1,3	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,15

Fonte: Alcoa

3.8 Endurecimento por precipitação em ligas de alumínio

O tratamento de precipitação usado para aumentar a resistência mecânica de ligas de alumínio, consiste basicamente em obter a formação de finos precipitados na matriz da liga, de tal modo, que estes atuem como obstáculos à movimentação das discordâncias e, conseqüentemente, endurecendo o material.

O alumínio quando microligado ao magnésio e ao silício forma, em equilíbrio e à temperatura ambiente, duas fases: a solução sólida de alumínio α , com estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC) e o composto intermetálico Mg_2Si . Devido a solubilidade sólida à temperatura ambiente, tanto do magnésio, quanto do silício no alumínio serem muito baixa quando adicionados ao alumínio, mesmo em pequenas quantidades, formam à temperatura ambiente o intermetálico Mg_2Si .

Na figura 11 é mostrado parte de um diagrama de fases da liga Al-Mg-Si com a representação da linha de resfriamento típica mostrando a formação das duas fases no estado sólido α e Mg_2Si (BORGES, 2015).

Figura 11 - Diagrama de fase Al Mg2

Fonte: ABAL, 2005 B

Soluções sólidas supersaturadas podem ser obtidas em ligas de alumínio pelo rápido resfriamento a partir da região de fase α até a temperatura ambiente. Nesta situação, não ocorrerá a formação do Mg_2Si à temperatura ambiente e para que isto ocorra, no tratamento térmico de homogeneização, o Mg_2Si primário presente na matriz deve ser dissolvido. A maioria dos intermetálicos entra em solução sólida a partir de $480^\circ C$, sendo as condições ideais de dissolução do Mg_2Si : temperatura de $580^\circ C$ por 2 horas.

As ligas menos sensíveis à têmpera podem ser resfriadas ao ar forçado.

Em ligas extremamente sensíveis à têmpera e com espessura do perfil maior do que 2,3 mm, só devem ser solubilizadas com abundância de água, promovendo um resfriamento muito rápido, no máximo em até 1 minuto. Sem os cuidados necessários na solubilização, os tratamentos térmicos de envelhecimento não irão proporcionar as propriedades mecânicas mínimas especificadas (ASM, 1991).

No envelhecimento ocorre a formação de compostos intermetálicos (precipitados) com átomos que foram colocados em solução sólida na solubilização. O resultado prático deste processo é o aumento da resistência mecânica do material. Pode ocorrer na temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou em temperaturas mais elevadas (envelhecimento artificial em forno, logo após a solubilização). O nível de resistência mecânica atingido está relacionado com a quantidade e o tamanho de precipitados presentes na liga.

Como já mencionado anteriormente no envelhecimento natural o material terá aumento gradativo da resistência mecânica com o passar do tempo, mas nunca atingirá os valores obtidos no envelhecimento artificial. Na liga extrudada a quente, o ideal é que todo o Mg e o Si estejam em solução sólida no alumínio. Nesta condição, observa-se a importância do conceito de sensibilidade à têmpera, onde ligas mais sensíveis necessitam de um resfriamento mais enérgico para que sejam solubilizadas ao final da extrusão.

3.9 Fadiga do alumínio

Para se aplicar o alumínio em componentes estruturais de alta solicitação um cuidado especial tem que ser tomado quando a durabilidade do componente em solicitações cíclicas elevadas.

Além de se considerar as tensões e rigidez da peça, uma variável importante que é a resistência à fadiga deve requerer uma atenção tanto nos cálculos como no teste físico do produto.

Conforme mostrado na figura 12, os materiais não ferrosos e ferrosos apresentam características de curva de fadiga distintos. Os ferrosos após uma determinada ciclagem apresentam características de vida infinita, já os não ferrosos não têm esse comportamento, o alumínio, objeto do estudo.

Vale destacar que um processo de *shoot peening* é uma alternativa para melhorar a resistência à fadiga dos materiais, que consiste em um jateamento especial da superfície da peça incrementando vida em fadiga ao componente. Basicamente é um “martelamento” da superfície da peça através de jateamento com granalha que pode ser de aço esférica, aço angular, ferro fundido, areia, cerâmicas especiais, vidro, entre outras, com distribuição granulométrica definida, conforme Prof. Dr. Bruno Scuracchio.

Figura 12 - Curva (S-N) típica de materiais não ferrosos (A) e ferrosos (B)

Fonte: CALLISTER, 2016

São observados dois tipos de comportamento S-N (Tensão-Ciclo) distintos, representados esquematicamente na figura 12. Como esses gráficos indicam,

quanto maior a magnitude da tensão, menor será o número de ciclos que o material será capaz de suportar antes de falhar. Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva S-N, figura 11B, fica horizontal para valores de N mais altos, ou seja, existe um nível de tensão limite chamando limite de resistência à fadiga (algumas vezes também chamado de limite de durabilidade), abaixo do qual a falha por fadiga não ocorrerá. Esse limite de resistência à fadiga representa o maior valor da tensão variável que não causará falha após, essencialmente, um número infinito de ciclos. Para muitos aços, os limites de resistência à fadiga variam entre 35% e 60% do limite de resistência à tração. A maioria das ligas não ferrosas (por exemplo, de alumínio, cobre e magnésio) não possui limite de resistência à fadiga, no sentido de que a curva S-N continua sua tendência decrescente nos maiores valores de N (figura 12A). Dessa forma, ao final, pode ocorrer uma fadiga, independente da magnitude da tensão. Para esses materiais, a resposta à fadiga é especificada como uma resistência à fadiga, definida como o nível de tensão no qual a falha ocorrerá para algum número de ciclos específico (por exemplo 10^7 ciclos), CALLISTER, 2015. Porém, ensaios de fadiga de ligas de alumínio com carregamentos repetidos na ordem de 10^8 ciclos ou mais tem se mostrado um critério usual de projeto (ASM-Handbook).

O quadro do chassi do veículo é a sua espinha dorsal, ou seja, o elemento estrutural que irá sustentar os principais componentes que o compõe. É a estrutura primária entre as rodas a cabine e a carroceria ou carreta. O projeto do quadro faz parte da competência central dos fabricantes de veículos. Existem muitos pontos de fixação e a integridade do quadro tem influência fundamental na dinâmica do veículo. Algumas características críticas do projeto do quadro como rigidez, resistência e durabilidade à fadiga são extremamente relevantes já que o quadro é submetido a torções, flexões, cargas de impacto, isso em toda sua extensão, de para-choque a para-choque.

Os caminhões como informado usam basicamente ligas de aço para a fabricação do quadro do chassi. Portanto, qualquer alteração no material, espessura da parede ou forma estrutural, resulta em alteração da rigidez e a forma de vibração do quadro. As mudanças de projeto são primeiramente

simuladas sob cargas estáticas, as quais são bem conhecidas, depois às dinâmicas.

A grande alteração ao se fazer uma redução da massa no veículo será pela introdução de um novo material, no caso em questão, o alumínio.

3.10 – Aços ABNT-NBR 6566 – principais características

Os aços ARBL, relativos à norma NBR 6566, são de uso frequente na indústria automotiva e especificamente em caminhões e ônibus, na formação do quadro do chassi desses veículos. Na sequência são apresentadas as principais características desses materiais por graus disponíveis, figura 13 e 14.

No caso do quadro do caminhão objeto do estudo os aços utilizados são os LNE 380 nas travessas e LNE 500 nas longarinas, vale reforçar que essa classe de aços são de uso da maioria dos fabricantes de veículos comerciais, caminhões, ônibus e rodas de caminhões.

Figura 13 - Composição química aços NBR 6566 (%)

Grau	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Al mín.	Nb máx.	V máx.	Ti máx.	Mo máx.	B máx.
LNE200 ^a	0,12	0,60	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE230 ^a	0,12	0,80	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE260 ^a	0,16	1,00	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE280 ^a	0,16	1,00	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE315 ^a	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE355 ^b	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE380 ^b	0,12	1,20	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE400 ^b	0,15	1,40	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE420 ^b	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE460 ^b	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE500 ^b	0,12	1,70	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE550 ^b	0,12	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE600 ^{b c}	0,15	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005
LNE650 ^{b c}	0,16	2,00	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005
LNE700 ^{b d}	0,18	2,10	0,55	0,030	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005

^a Para os graus LNE200, LNE230, LNE260, LNE280 e LNE315, o somatório dos teores de Nb, Ti e V deve ser no máximo de 0,20.

^b Para os graus LNE355, LNE380, LNE400, LNE420, LNE460, LNE500, LNE550, LNE600, LNE650 e LNE700, o somatório dos teores de Nb, Ti e V deve ser no mínimo de 0,010 e no máximo de 0,22.

^c Para os graus LNE600 e o LNE650, o teor de Cr deve ser máximo 0,50 %.

^d Para o grau LNE700, o teor de Cr deve ser no máximo 0,60 %.

Fonte: ABNT

Figura 14 - Propriedades mecânicas dos aços

Grau	Limite de escoamento MPa	Limite de resistência MPa	Alongamento ($L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$) mínimo %	Calço de dobramento a 180° em função da espessura nominal "e" mm
LNE200	200 a 330	280 a 410	35	Zero
LNE230	230 a 360	330 a 460	30	
LNE260	260 a 390	370 a 500	30	
LNE280	280 a 420	380 a 520	28	
LNE315	315 a 455	390 a 530	25	
LNE355	355 a 510	430 a 570	24	
LNE380	380 a 530	460 a 600	23	
LNE400	400 a 530	520 a 650	23	
LNE420	420 a 540	520 a 650	22	e ≤ 10,00 – Zero e > 10,00 – 0,5 e
LNE460	460 a 580	540 a 680	18	e ≤ 10,00 – 0,5 e e > 10,00 – 1,0 e
LNE500	500 a 620	560 a 700	18	
LNE550	550 a 670	600 a 760	15	1,5 e
LNE600	600 a 720	650 a 800	14	
LNE650	650 a 790	690 a 850	12	2,0 e
LNE700	700 a 850	750 a 950	12	2,0 e

Fonte: ABNT

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise de viabilidade técnica de substituição da liga de aço ARBL pela liga de alumínio AA6082 na fabricação do quadro do chassi foram utilizados os métodos:

- Por rodagem do veículo, quadro em aço, processo usual e de conhecimento de cada empresa.
- Por cálculo de FEA (*Finite Element Analysis*) quadro em aço e alumínio

Para o cálculo por FEA o modelo CAD - Computer Aided Design - do quadro em aço foi discretizado em elementos retangulares/triangulares de dimensão média de 10 mm, de casca fina, aplicando diretamente a teoria de Placas e Cascas de Timoshenko & Krieger, que reduz capacidade de carga computacional.

Após a correta discretização dos modelos CAD em modelos de elementos finitos são aplicadas as condições de contorno e os carregamentos do veículo para se avaliar os dois quadros. O software utilizado foi o Abaqus versão 6.13 da Dassault Systèmes, de uso corrente na indústria automotiva.

No caso do quadro em alumínio 6082 somente foi utilizado o cálculo por FEA, comparativamente ao cálculo do quadro validado e desenvolvido com aços ARBL, ou seja, a correlação toma como referência uma situação plenamente validada.

Esses métodos permitem uma correlação entre as alternativas e oferecem um cenário de factibilidade ou não do emprego da liga de alumínio no componente em análise.

Como é uma fase de estudos é de fundamental importância que o quadro em aço esteja totalmente validado, tanto por rodagem como por cálculos.

Para se validar o projeto do quadro do caminhão em aço, que é o objeto de referência para se correlacionar com o quadro em alumínio, a prática é a de se colocar o caminhão em testes de rodagem típica da aplicação do veículo, bem como confrontar os resultados dessa rodagem com uma análise típica de cálculo

de Elementos Finitos, para assim se assegurar com elevado nível de certeza que a referência foi testada, validada e aprovada conforme procedimentos técnicos usuais no setor automotivo.

O principal laboratório de validação de um veículo no setor automotivo é a rodagem do mesmo em diversas condições de uso.

O caminhão usado para análise é de rodagem tipicamente urbana, de coleta e distribuição de carga. Esse veículo passou pelo seguinte teste de rodagem em durabilidade:

• Percurso total rodado:	100.000 km
• Trecho urbano:	70.000 km
• Trecho rodoviário	30.000 km

O trecho predominante rodado é o urbano, em percurso constante, circuito e velocidades definidas, sempre pelo lado direito da rua ou avenida, onde se tem as piores condições do piso.

Para se avaliar o produto em diferentes condições as cargas são alocadas na carroceria do veículo para cada condição de teste nos trechos acima definidos, tanto urbano como rodoviário, sendo:

- 5% vazio
- 10% meia carga
- 85% carga total

Na figura 15 é mostrada a condição de carregamento do caminhão para se fazer os testes de rodagem. Normalmente são usados contêineres abastecidos com água, o que facilita o ajuste da carga e permitindo sua adequada distribuição nos eixos, tanto dianteiro como traseiro.

Figura 15 - Veículo em teste funcional e durabilidade, destaque ao carregamento

Fonte: Foton Caminhões Brasil

Essas condições de carga são fundamentais para se avaliar o veículo nas três condições prováveis de uso, checando-se assim eventuais situações adversas de dirigibilidade, frenagem, vibrações, estabilidade e ruído, bem como consumo de combustível.

Como teste extraordinário de solicitação extrema o veículo, após sua validação em durabilidade, um conceito de teste em “laboratório”, realizou uma rodagem adicional de 10.000 km com sobrecarga de 1 tonelada, ou seja, 10% da capacidade homologada estabelecida, que é de 10 toneladas totais.

Praticamente é uma rodagem de 24 horas, com paradas para refeições, bem como para as revisões planejadas ou revisões conforme a demanda e resultados dessa rodagem se apresentarem, quebras, falhas, inspeções ou eventos aleatórios.

Dessa forma, após o veículo passar por esse “laboratório”, obtém-se o relatório de validação e liberação do produto para sua industrialização e comercialização, ou seja, o produto está liberado para comercialização.

Dentro de um conceito de *double check*, os pontos destacados pela engenharia são submetidos a cálculos de resistência por FEA, principalmente o quadro do chassi que é o elemento estrutural vital do caminhão, nele praticamente todos os elementos primordiais da construção do veículo estão fixados direta ou indiretamente.

Para avaliação de forma coerente quanto a substituição dos materiais foi feita uma análise dos processos produtivos da longarina para assegurar a utilização dos componentes periféricos do chassi do caminhão independente do material a ser utilizado, assim a atratividade do projeto se torna mais relevante. Diante disso foram estudados os processos produtivos para os dois materiais com visitas técnicas nas empresas produtoras dos componentes, bem como foram feitas consultas sistemáticas aos especialistas de cada empresa.

A avaliação econômica deverá seguir a linha aqui apresentada, porém com dados consistentes, analisando-se tanto o impacto do uso do alumínio, com seu ganho em capacidade de carga, bem como é avaliado o impacto no custo variável do produto e seu impacto no custo operacional.

Nos casos de investimentos os mesmos são comparados em VP-Valor Presente, ou seja, o desembolso na fase inicial do projeto, até sua industrialização.

Para se avaliar o impacto do ganho de capacidade de carga e transformando esse ganho em valores mensais, por 5 anos, foi considerado para essa projeção a quantidade de latas de refrigerantes de 350 ml, massa considerada de 350 g, com um valor de R\$ 1,50 e remuneração mensal do faturamento extra com uma taxa de remuneração do capital de 0,8% ao mês. Para o cálculo é utilizada a calculadora financeira **HP 12C**.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados e discutidos baseados nos estudos relacionados em 3 aspectos:

Análise mecânica estrutural por FEA

- Análise do processo produtivo pela produção em alumínio extrudado
- Análise do custo operacional pela maior capacidade de carga disponível

5.1 Análise Mecânica Estrutural

Os testes de rodagem apresentaram resultados plenamente satisfatórios e permitiram a aprovação do produto com quadro em aço para industrialização e comercialização. Naturalmente a rodagem do veículo em testes de durabilidade não é feita só para validar o quadro do chassi, mas o veículo como um todo.

Os cálculos por FEA foram feitos para longarinas com dois materiais, LNE 380 e LNE 500. O material aprovado e utilizado foi o LNE 500, mas ao se analisar os resultados com o LNE 380 somente um ponto de alerta foi destacado, onde ocorria uma tensão superior ao limite de elasticidade do material, como pode ser observado na figura 13. Destaca-se que é uma tensão bem definida estando em um dos furos de localização para o processo de estampagem, não sendo possível atender a recomendação apontada para se deslocar o furo.

Figura 16 - Tensão superior à especificada para o material da longarina em aço

Fonte: Foton Caminhões

Esse resultado trouxe um momento de reflexão para a avaliação do componente, longarinas e travessas, com a liga de alumínio, no caso a 6082, por ser estrutural e disponível, e que fossem produzidas por extrusão. Isso decorre do fato de o quadro estar plenamente dentro dos limites de tensão estabelecidos para os materiais LNE 380 e LNE 500, com uma adequada reserva técnica, ou seja, um quadro totalmente “azul”, com exceção desse ponto acima destacado.

Com base nesse resultado foi feito o cálculo por FEA do mesmo quadro, agora com o material alumínio 6082. Os resultados estão demonstrados na sequência.

É fundamental reforçar as seguintes premissas:

- As condições de contorno são idênticas para os dois materiais
- O objetivo desse estudo não é validar o novo conceito de quadro, mas sim verificar se o mesmo é plausível.
- Os resultados apresentados estão na forma de nível de consumo da tensão de escoamento ditados pela equação:

$$Resultado[\%] = \frac{\sigma_{FEA}}{\sigma_{Yield}} \times 100$$

Onde: σ_{FEA} , tensão resulta

σ_{Yield} , tensão de escoamento

Explicando o cálculo acima, quando tivermos 100% quer dizer que a tensão atingiu o limite especificado para o material e acima disso quanto está superando essa tensão, 200% quer dizer atingiu 100% e passou outros 100%, é uma forma simples de abordar os resultados sem criar fórmulas que mais complicariam o entendimento.

Na tabela 4 são apresentadas as características dos materiais considerados para os respectivos cálculos de FEA, tanto para o aço como alumínio, e sempre ressaltando que os carregamentos foram sempre os mesmos, só se alterando o material.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos materiais aço e alumínio

Dados dos Materiais

Material	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson	Limite de Escoamento	Deformação de Ruptura	Limite de Ruptura
	E	ν	σ_{yield}	ϵ	σ_u
	[Mpa]	[]	[Mpa]	[%]	[Mpa]
LNE 380	210.000	0,3	380	18	460
LNE500	210.000	0,3	500	12	550
AA6082	70.000	0,33	260	8	310

Fontes: ArcelorMittal, Alcoa

Vale destacar que o módulo de elasticidade do aço é o triplo do alumínio, e com certeza aí está o grande desafio para uma solução em se conceber um quadro mais leve, além da menor resistência ao escoamento e ruptura do alumínio; mas o objetivo é estudar a situação para se estabelecer um ponto de partida definindo os locais críticos em termos de solicitações mecânicas.

Na figura 17 são apresentados os materiais utilizados nos cálculos, suas posições e a massa do quadro com os respectivos materiais, sendo que o quadro em aço atingiu 335 kg e o quadro em alumínio 114 kg.

Vale destacar que toda geometria do quadro em aço foi mantida para o quadro em alumínio, unicamente o material foi substituído, ou seja, saiu o aço entrou o alumínio 6082.

Essa ação foi feita para se estabelecer uma referência analítica como ponto de partida para as considerações de cada resultado do FEA. Já se sabe que esse processo sem abordar reconfigurações de projeto não deve ser factível, mas deve fornecer um bom resultado para se evoluir na concepção de uma solução para o novo material.

Figura 17 - Definições básicas do quadro em aço e em alumínio

Fonte: Foton Caminhões

Para o quadro em alumínio foi considerada a liga 6082 T⁶, tratada e solubilizada artificialmente, de uso geral em elementos estruturais no setor automotivo, carrocerias de alumínio, por exemplo. O quadro atinge uma massa de 114 kg, ou seja, acarreta uma redução de massa de 221 kg, 67% da massa do quadro em aço. Na prática a redução potencial esperada é algo em torno de 40%, como estudo da ALCOA/METALSA, pois reforços topológicos devem ser introduzidos no quadro em alumínio para adequar a estrutura do componente às solicitações resultantes dos carregamentos, ou seja, não é uma redução só em função da menor densidade do alumínio que se pode considerar, pois uma massa adicional de alumínio ou outro material tem que ser considerada e ser introduzida no componente para se adequar a rigidez e resistência.

Na sequência serão apresentados os principais resultados obtidos pela análise numérica dos quadros de forma comparativa aço versus alumínio.

Na figura 15 os resultados do quadro em flexão estática mostram uma direta correlação com os módulos de elasticidade de cada material, ou seja, o deslocamento entre aço e alumínio correspondem a 1:3, 12,43 mm no aço, para 35,13 mm no alumínio.

Uma informação interessante é a de se observar que na região central do quadro a situação não é crítica, região em “azul”. Isso é um dos primeiros dados analíticos do estudo. Para uma boa orientação ao lado esquerdo estará sempre o resultado do quadro em aço e à direita a do em alumínio, sempre com as mesmas solicitações.

Figura 18 - Comparativo das deflexões dos quadros em flexão estática

Fonte: Foton Caminhões

Esse primeiro resultado já sinaliza um potencial de evolução na análise, normalmente se tem uma rejeição a esse tipo de comparação e análises, vindo sempre o dito “O alumínio é fraco e mais caro”. É necessário se evoluir na análise de forma isenta e fundamentar tecnicamente o verdadeiro real limite físico do material, pois grandes oportunidades podem ser exploradas.

Na figura 19 ao se submeter o quadro em flexão estática pode-se observar uma tensão 10% superior à especificada para o alumínio, esse local é onde se apoia o console da mola traseira, indicando assim um dos locais a ser analisado em detalhe e se aplicar um reforço na região. Outros dois pontos apresentam também elevada tensão, e também devem ter soluções locais para atenuar esse nível elevado de tensão.

Figura 19 - Níveis de tensões em flexão estática

Fonte: Foton Caminhões

Na figura 20 é apresentado o deslocamento do quadro em condições do veículo em curva, e o quadro em alumínio apresenta deslocamento de 63,38 mm que é 3 vezes superior ao do quadro em aço, 20,03 mm, condição física coerente com a diferença entre os módulos de elasticidade dos materiais, que deve ser objeto de análise para uma adequação da rigidez necessária para o produto.

Figura 20 - Níveis de tensões em flexão estática

Fonte: Foton Caminhões

Na figura 18 temos os níveis de tensão em condições de curvas, nessa situação apresenta-se a região com maior nível de tensão, na região de fixação da mola traseira, que atinge 206,0%, ou seja, mais que o dobro admitido para o alumínio.

Esse resultado é coerente com a física do produto, pois nessa região é onde está a maior parte da carga transportada e as molas tem a função também de assegurar o posicionamento do eixo.

Esta é uma região que merece uma análise topológica especial, para que a resistência local seja perfeitamente adequada às condições de carga e rodagem do veículo.

Figura 21 - Níveis de tensões em curvas, região crítica indicada C=206,0

Fonte: Foton Caminhões

Nessa condição de carga dois pontos se destacaram com níveis de tensões superiores à do material, região frontal com 111,2%, ou seja 11,2% acima da tensão admissível, e a região com 206,0%, isso se justifica por ser esse o local do suporte de sustentação da mola traseira do veículo, sendo essa a razão de aí se ter uma travessa estrutural. Mais um diagnóstico coerente com as solicitações mecânicas que o quadro está submetido.

Na figura 19 mais um resultado coerente onde os deslocamentos sob torção, nos mesmos pontos, apresentam a relação 1:3. Sendo 55,37 mm para o aço e 156,0 mm para o alumínio, resultado dos diferentes módulos de elasticidade dos materiais; essa região analisada é onde fica o suporte dianteiro da mola

dianteira. Uma análise mais detalhada é necessária para uma adequação do quadro à necessidade do produto.

Figura 22 - Comparativo do deslocamento dos quadros em torção

Fonte: Foton Caminhões

Na figura 20 são destacados os pontos com níveis de tensão acima do especificado para o alumínio em condição de torção. Essa condição na região do entre eixos do produto já era esperada, porém os níveis não são tão elevados como o apresentado na região de fixação da mola traseira, indicado na figura 18.

Cada ponto indicado deve ser submetido à uma análise específica para contornar e adequar a tensão local à especificada para o alumínio, atendendo a aplicação de uso do produto.

É importante destacar que a adequação estrutural do quadro em alumínio também deve levar em consideração as condições de solicitação à fadiga do componente. Talvez esse seja o grande desafio estrutural do projeto, pois também a rigidez da estrutura deverá ser avaliada para fornecer a mesma condição de dinâmica veicular, principalmente a estabilidade torsional.

Nessa condição quatro regiões apresentaram níveis de tensões acima do limite do material, alumínio no caso, porém são níveis possíveis de serem diminuídos com soluções topológicas nas respectivas regiões.

Figura 23 - Níveis de tensões em torção

Fonte: Foton Caminhões

Na sequência, figura 21, será apresentada em detalhes a região mais crítica indicada na figura 20, para se entender a situação de tensões na região $C=130,3\%$.

Figura 24 - Níveis de tensões em torção, região $C=130,3\%$

Fonte: Foton Caminhões

Nessa região em destaque na figura 21 é onde está o suporte traseiro da mola dianteira, e as concentrações de tensões estão ao redor dos furos de fixação do suporte e aba superior da longarina. Com uma análise mais específica

pode-se obter formas de reforçar a região adequadamente, atendendo o nível de tensão do alumínio.

Essas regiões de fixação de suportes em geral, merecem uma análise mais apurada ao se desenvolver o projeto no seu detalhe, aparentemente não são regiões de tensões extremas, mas sim elevadas.

Como o quadro é simétrico, os níveis de tensões destacados são equivalentes em posições simétricas, assim deve ser considerado na leitura dos resultados.

Com base nos resultados obtidos por FEA para o alumínio e correlacionados com os do quadro em aço, considera-se factível aprofundar o estudo para se viabilizar o quadro em alumínio, assim permitindo criar um cenário econômico para essa alternativa, que está apresentado na sequência.

Objetivando simular uma alternativa para reduzir a tensão nessas regiões foram feitas diversas simulações por FEA aumentando-se a espessura geral dos componentes do quadro de forma escalonada de 10% até a máxima de 60%. Nessa última condição a situação de todas as tensões ficaram abaixo do limite de escoamento do alumínio e com relativa reserva. Na figura 22 são apresentadas as tensões considerando que todas as peças que compõem o quadro tiveram suas respectivas espessuras aumentadas em 60%. Nessa situação o quadro ficou com uma massa de 175,6 kg, ou seja, partindo da massa do quadro em aço que era de 335 kg houve uma redução de 159,4 kg. Para efeito de cálculos econômicos serão considerados somente 150 kg.

Para se chegar nessa situação a escolha de aumento progressivo escalonado de 10 em 10 por cento foi a forma simples adotada e que facilitou os cálculos.

Figura 25 - Níveis de tensões em curvas com espessuras aumentadas em 60%

Fonte: Foton Caminhões

5.2 Avaliação dos processos produtivos

Na sequência são avaliados os impactos produtivos, tanto em investimento como em adequação do projeto em alumínio, para se atender o processo de fabricação por extrusão. E por fim, o impacto no custo operacional e custo final do caminhão ao ser fabricado com o quadro esse material.

Na figura 23 segue uma ampla vista do quadro, objeto do estudo de redução de massa, através do uso de alumínio nas longarinas e travessas, como pode ser observado, no quadro do chassi é onde tudo se agrega.

O motor, transmissão, eixo propulsor e eixo traseiro são responsáveis por fornecerem a capacidade de tração do veículo, suas acelerações, arranques e retomadas de velocidades, esses componentes estão montados de forma indireta no quadro do chassi do veículo, normalmente apoiados em elementos elásticos para filtrar as suas vibrações.

Outros componentes como, molas da suspensão, tanque de combustível, tanques de ar para os freios, suporte do estepe, baterias, tanque de aditivo para minimizar emissões, são montados diretamente em suportes fixados nas longarinas.

A cabine também é montada no chassi sobre elementos elásticos, visando contribuir para o conforto dos ocupantes da mesma.

Sistemas de arrefecimento, tanto para a água do motor como para o ar de admissão também são montados sobre elementos elásticos que se apoiam no quadro do chassi.

Resumindo, o quadro do chassi é o elemento integrador do veículo, no caso do objeto em estudo, o caminhão. Isso é similar para todos os caminhões, independente da capacidade de carga.

Figura 26 - Quadro do chassi objeto do estudo

Fonte: Foton Caminhões

5.2.1 Cálculo dos investimentos em ferramentais

Serão avaliados os investimentos para o quadro em aço e em alumínio conforme o processo produtivo considerado, sendo o aço por estampagem, e o alumínio por extrusão. Na figura 24 é apresentada a prensa utilizada para se estampar as longarinas em aço, fornecendo uma idéia da complexidade e dimensões do ferramental para atender o tradicional e usual processo de fabricação das longarinas, é uma prensa com capacidade de até 5.200 toneladas, conforme informação da empresa Maxion.

Figura 27 - Prensa Maxion para estampagem de longarinas de até 12 m

Fonte: Maxion

Para se desenvolver o quadro (longarinas e travessas) do chassi do caminhão em aço são necessários investimentos expressivos em ferramentais de estampagem. Normalmente o quadro é formado por longarinas, sendo uma para o lado direito e outra para o esquerdo, isso exige ferramentais específicos devido as peças não serem perfeitamente retilíneas em toda sua extensão.

Além dos ferramentais das longarinas são necessários ferramentais para a produção das travessas, algumas por estampagem, outras por dobra, que não exigem investimentos, quando são usadas ferramentas universais para conformação por dobra.

Os ferramentais das longarinas demandam um investimento de aproximadamente R\$ 2.000.000,00 para cada peça, o que totaliza R\$ 4.000.000,00.

Para as travessas, dependendo do projeto, podemos considerar duas travessas estampadas, que demandam um investimento de R\$ 250.000,00 por peça, totalizando um adicional de investimentos de R\$ 500.000,00.

Dessa forma os recursos em ferramentais para se produzir o quadro do veículo de 10 toneladas de capacidade de carga total e com comprimento de longarinas de 8,0 metros, totaliza um valor total de R\$ 4.500.000,00.

O conceito adotado pelo presente estudo, no caso do uso do alumínio, é o de se utilizar o processo de produção das longarinas e travessas por extrusão, para isso é condição fundamental que as longarinas sejam totalmente retilíneas, assim fica assegurada a viabilidade técnica de se extrudar as peças.

O investimento para se produzir a ferramenta com o perfil da longarina com dimensões de altura 192 mm, largura da aba 65 mm e espessura de 6 mm, em forma de “C” foi estimado em R\$ 25.000,00. Porém, além do ferramental das longarinas, são necessários ferramentais para as travessas e terminais, que unem as travessas às longarinas, estima-se que sejam necessários seis ferramentais de extrusão, sendo:

- 1 para as longarinas (sendo retilíneas só necessita uma ferramenta)
- 4 para as travessas
- 2 para os terminais
- 1 jogo de ferramentas/máscaras de furação

Os sete ferramentais têm dimensões próximas, portanto o custo dos mesmos será de R\$ 175.000,00, para o conjunto de ferramentas de extrusão, e o de furação mais R\$ 100.000,00, totalizando R\$ 275.000,00.

Agora pode-se comparar os custos dos ferramentais para atender os processos produtivos dos dois materiais em estudo:

- Ferramental para o aço R\$ 4.500.000,00
- Ferramental para o alumínio R\$ 275.000,00

Em termos de atratividade financeira a vantagem para o processo em alumínio extrudado é indiscutível, na faixa de R\$ 4.225.000,00.

Vale mencionar a complexidade do fluxo de material durante o processo produtivo das longarinas em aço. A sequência abaixo é meramente orientativa, para fornecer uma ideia básica:

- Etapa 1 recortar o *blank* da longarina
- Etapa 2 estampagens do *blank* para conformar a longarina
- Etapa 3 estampar para criar a furação da longarina
- Etapa 4 estampar para calibração final das peças
- Como é em aço, pintar para evitar corrosão, custo estimado em R\$ 400,00.

Em contrapartida ao processo para o aço, no caso do alumínio se antevê uma simplificação e facilidade produtiva:

- Etapa 1 extrudar o perfil
- Etapa 2 cortar na medida necessária
- Etapa 3 furar com máscaras de furação
- Vale destacar que não é necessário pintar o quadro

5.2.2 Impacto pela introdução do alumínio no custo variável do produto

Um comparativo entre as duas soluções aço x alumínio é necessário para se ter a dimensão do impacto do custo/preço do produto final.

O quadro em aço apresenta uma massa de 335 kg, sendo:

- 235 kg do material LNE 500 (R\$ 5,51/kg) = R\$ 1.294,85
- 100 kg do material LNE 380 (R\$ 4,85/kg) = R\$ 485,00
- Custo da pintura = R\$ 400,00

Custo total = R\$ 2.179,85

Para o quadro em alumínio, levando-se em consideração a redução de massa conseguida pela ALCOA/Metalsa, que foi da ordem de 40%, e como o caminhão em estudo é de uma categoria bem menor, será admitida uma redução de massa de 150 kg (44,8%), isso se transformara em capacidade de carga paga adicional a ser transportada pelo caminhão, denominada de *pay load*.

Ou seja, está sendo considerada uma massa a ser acrescentada ao caminhão na ordem de 71 kg, estrategicamente localizada, para adequar a rigidez e resistência nos pontos destacados pela análise por FEA, pois a introdução do alumínio antes dos reforços resulta numa massa de 114 kg para o quadro, o que pela análise mostra-se insatisfatória para adequar a estrutura do quadro.

O quadro em alumínio deve ter uma massa de 185 kg, sendo

- 185 kg do material alumínio 6082 (R\$ 20,76/kg) = R\$ 3.840,60
Custo total = R\$ 3.840,60

O impacto de custo no produto será de:

$$\text{R\$ 3.840,60} - \text{R\$ 2.179,85 (quadro em aço)} = \text{R\$ 1.660,76}$$

Esse custo tem potencial de ser repassado ao preço do veículo, neutralizando seu impacto, pois o custo/benefício é favorável ao quadro em alumínio, pelos 150 kg de *payload* obtidos.

O valor atual, abril/2018, de mercado desse veículo é de aproximadamente R\$ 150.000,00, ou seja, o impacto de custo é marginal.

5.3 Vantagens no custo operacional do caminhão

O objetivo principal da função de um caminhão é o de transportar cargas em geral. Muitos estudos de otimização desses veículos são objetos de estudos pelas montadoras. Normalmente se busca maximizar a plataforma de carga, local onde a carroceria ou implemento são montados. Redução do consumo de combustível por adequações do trem-de-força, motor/câmbio/eixo traseiro e também otimizações aerodinâmicas são estudadas.

A redução da massa veicular em automóveis já vem ocorrendo de longa data, mas em caminhões é algo mais recente, e a ação da ALCOA/Metalsa é a situação de referência em caminhões pesados.

Com base nesse estudo das empresas acima, que foca caminhão pesado, foi extrapolada a mesma intenção para um caminhão urbano.

Com base nos resultados obtidos nesse estudo, torna-se possível avaliar o seguinte estudo de caso para o custo operacional de um caminhão de distribuição de bebidas:

- A introdução do alumínio tem um potencial de aumento da capacidade de *pay load* de 150 kg
- Uma lata de refrigerante de 350 ml tem massa aproximada de 350 g
- Resultando em potencial de carga de 428 latas a mais por viagem do caminhão
- Cada lata tem um valor de R\$ 1,50

- Que resulta em uma receita por viagem de $R\$ 1,50 \times 428 = R\$ 642,00$
- Considerando 22 viagens por mês resulta em receita mensal de $R\$ 642,00 \times 22 = R\$ 14.124,00$
- Considerando vida útil do caminhão de 60 meses, isso resulta em uma receita nominal de $R\$ 14.124,00 \times 60 = R\$ 847.440,00$, em faturamento bruto, a margem de lucro depende de cada produto que seja transportado.
- Que se for aplicada a 0,8% a.m. atinge $R\$ 1.082.235,00$ no mesmo período. Calculadora financeira HP12C.
- O que equivale ao valor de 7,2 caminhões!

Esse estudo de caso foi feito para um produto com baixo valor agregado, que se for considerado para produtos eletrônicos ou cosméticos pode apresentar vantagens ainda mais relevantes, casos a serem estudados.

6 CONCLUSÃO

O estudo da introdução do alumínio 6082 em lugar dos aços ARBL no quadro do chassi do caminhão leve permitiu concluir que:

- Existem pontos críticos na estrutura do quadro do chassi em alumínio, acima do limite de escoamento, contudo podendo ser efetuada uma análise mais específica para se adequar estruturalmente essas regiões.
- O nível de investimento para se produzir o quadro em alumínio extrudado é substancialmente inferior ao em aço.
- O custo operacional do caminhão com o quadro em alumínio, considerando um adicional de carga paga – *pay load* – de 150 kg é favorável ao quadro com o material analisado.
- Quando considerado aspectos técnicos, produtivos e econômicos os resultados mostram que é possível usar alumínio no lugar do aço no quadro do chassi do caminhão estudado

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-NBR 6566. ***Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Requisitos***. Terceira edição, 12.12.2016.

ASM Handbook, ***Fatigue and Fracture***, Volume 19, ASM International, 1996, p.2012, p.2044

BORGES, A. A. C. ***Efeito do jateamento com granalhas de aço na tensão residual e no comportamento mecânico da liga de alumínio 6082***, 2017. 158 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo

BROOKE L., Evans H. ***Lighten up!***, *Automotive Engineering*, 2009 pag. 117, 16–22.

CALLISTER, W. D.; RETWISCH, D. G. ***Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução***. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 8ª edição, 2016

CONFIDENCE REPORT LIGHTWEIGHTING, ***NACFE***, pag. 32-34, August 2015.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION AISBL; ***ALUMINIUM IN COMMERCIAL VEHICLES, CHAPTER III***, revisão 2, agosto 2011, pag. 22. Disponível em: <<http://tubarao.arcelormittal.com/pdf/produtos/catalogos/catalogo-acos-planos-america-sul.pdf>> Acesso em: 16/03/2018

HALONEN, A. ***Lightweight materials for heavy trucks***, 2016. Disponível em: <www.oemoffhighway.com/drivetrains/hardware/article/12158450/lightweight-materials-for-heavy-trucks>. Acesso em 20.06.2019.

HOVORUN, T. P.; BERLADIR, K. V.; PERERVA, V. I.; RUDENKO, S. G.; MARTYNOV, A. I. ***Modern materials for automotive industry***. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322096172_Modern_materials_for_automotive_industry>. Acesso em 09/07/2019.

IAB, ***Instituto Aço Brasil***, 2020.

ISAAC, M. ***The Battle of the Bodies: Steel vs. Aluminum in Automotive Production***, posted on February 05, 2018. Disponível em: <www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/16437/The-Battle-of-the-Bodies-Steel-vs-Aluminum-in-Automotive-Production.aspx#disqus_thread>. Acesso em 30/06/2019.

MALLICK, P. K. ***Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles***. Woodhead Publishing Limited, 2010, 1-30.

MALLICK, P. K. ***Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles***. Woodhead Publishing Limited, 2010.

POWERS, W. F. ***Automotive materials in the 21st century, Advanced Materials and Processes***, 2000, 38–41.

SAITO, K.S., **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA SOBRE O USO DE LIGAS DE ALUMÍNIO NA FABRICAÇÃO DE EIXOS TRASEIROS TRATIVOS PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS COMERCIAIS**, Universidade Presbiteriana Mackenzie, dissertação de mestrado, 2012

Sites Consultados

<https://youtu.be/3SEy6sIPZTg>. Acesso 01.04.2017.

www.mercedes-benz.com.br. Acesso 01.04.2017.

www.man-la.com. Acesso 01.04.2017.

<http://alutrat.com.br/servicos/tratamento-termico/solubilizacao-e-envelhecimento-artificial-ou-precipitacao-t6>. Acesso em 20.06.2019.

www.fordcaminhoes.com.br. Acesso em 01.04.2017.

<https://www.theglobeandmail.com/globe-drive/adventure/red-line/mass-reduction-auto-makers-learn-to-lighten-up/article20980583/>. Acesso em 01.04.2017

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento,
associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**