

ANÁLISE MECÂNICA ESTRUTURAL E VIABILIDADE ECONÔMICA NA SUBSTITUIÇÃO DE AÇOS ARBL PELA LIGA DE ALUMÍNIO 6082 EM QUADRO DE CHASSI DE CAMINHÃO

A. E. F. Sirolli^{1,2}; L. L. Gedanken¹; R. Guerra³; F. E. P. de Azevedo³; J. E. F. de Camargo³; A. A. Couto^{2,4}

¹Foton Aumark do Brasil

²IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

³Schwaben Engineering

⁴Universidade Presbiteriana Mackenzie

Rua Montesquieu, 105 ap. 82 CEP-04116-190; São Paulo, SP

eustaquio.sirrolli@gmail.com

RESUMO

O objetivo do estudo é avaliar uma alternativa técnica e econômica ao se modificar o quadro do chassi, que é feito em aço ARBL (Alta Resistência Baixa Liga) por processo de estampagem, pela liga de alumínio 6082, obtida pelo processo de extrusão, com conseqüente redução da massa do quadro. Os resultados da análise estrutural indicam regiões com níveis de tensões elevadas no quadro da liga de alumínio 6082, necessitando de reforço. As avaliações econômicas acenam em favor da liga de alumínio, principalmente em soluções de baixo volume de produção, quando o investimento requerido para o ferramental de extrusão é sensivelmente menor do que o requerido para se fabricar o chassi em aço. Quanto ao custo operacional, a vantagem é ainda mais expressiva pela carga adicional transportada, que foi projetada e valorizada para uma vida útil do produto de 60 meses.

Palavras chaves: ligas de alumínio, MEF, chassi, quadro, caminhão.

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. O objetivo desse estudo é avaliar a possibilidade de substituição do quadro em aço ARBL – Alta Resistência Baixa Liga - do chassi de caminhão leve na faixa de 10 toneladas de capacidade de carga total, por uma liga de alumínio extrudado AA 6082 T6, assim ganhando maior capacidade de carga paga. O uso de liga de alumínio em veículos comerciais, caminhões e ônibus, traz como vantagem a potencial redução de massa veicular, já que sua densidade de $2,7 \text{ kg/cm}^3$ traz muitas vantagens quando comparada com a do aço de $7,8 \text{ g/cm}^3$.

Historicamente, os aços de alta resistência baixa liga (ARBL) LNE 380 e LNE 500 [ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR6566] são de uso predominante nos componentes 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. Nesta aplicação o aço é utilizado 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.

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 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 1 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.

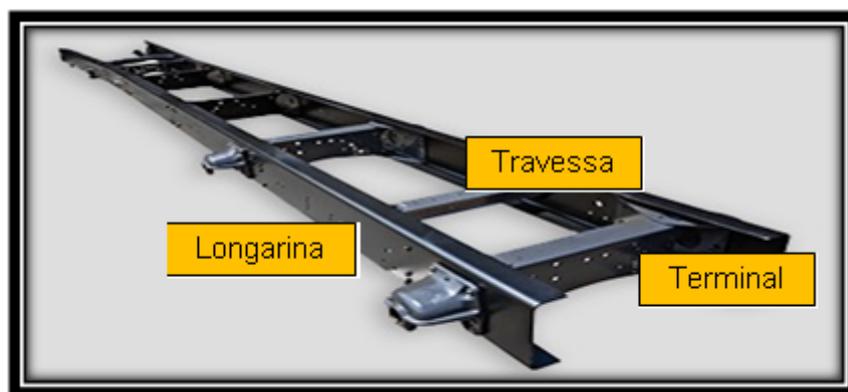
Na figura 2 é apresentado o componente quadro do chassi, objeto abordado no presente estudo, onde estão destacados elementos estruturais vitais: as longarinas e as travessas / terminais. Esses elementos formam algo similar a uma escada,

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 de uma liga de alumínio produzida por extrusão neste caminhão de uso urbano para distribuição de carga.



Foto: Foton Caminhões

Figura 1: Veículo sem carroceria com capacidade de carga total de 10 toneladas.



Fonte: ArcelorMittal [1]

Figura 2: Quadro do chassi com seus componentes principais em destaque.

A liga de alumínio 6082, produzida por extrusão, solubilizada e envelhecida artificialmente é de uso abrangente no mercado por sua resistência mecânica [2], podendo ser indicada para substituição dos aços ARBL, LNE 380 e LNE 500. Dentre as ligas de alumínio da série 6XXX, a que apresenta maiores valores de resistência mecânica é a 6082. Este tipo de aço, ARBL, é o material usual nos veículos das

principais montadoras de caminhões do Brasil [3-5], devido à sua adequação ao processo de estampagem e à elevada resistência mecânica e soldabilidade. Vale destacar que no mercado nacional mais de 90% dos perfis extrudados são de ligas de alumínio da série 6XXX.

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 o produto concebido. Este estudo leva em consideração em sua análise a premissa de que os mesmos periféricos usados no quadro em aço sejam possíveis de serem usados no quadro em alumínio. Essa é uma condição fundamental, assim o uso da liga de alumínio ou aço no veículo é uma questão de opção 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, sendo que a rigidez do quadro em liga de alumínio seja próxima do aço por meio da adequação estrutural. O objetivo geral do estudo é avaliar técnica e economicamente a substituição do quadro do chassi de caminhão urbano de aço alta resistência baixa liga (ARBL) pela liga de alumínio 6082 obtida por extrusão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise de viabilidade de substituição do aço pelo alumínio foram utilizados dois métodos de avaliação estrutural do quadro em aço ARBL, que será a referência para se analisar de forma correlacionada o quadro em liga de alumínio 6082: por rotação do veículo e por cálculo de FEA (*Finite Element Analysis*). Desta maneira, o modelo CAD (*Computer Aided Design*) do quadro em aço é discretizado em elementos retangulares de casca fina, aplicando diretamente a teoria de placas e cascas de Timoshenko & Krieger, que reduz a capacidade de carga computacional e a espessura de 6 mm é bem inferior a largura e comprimento do componente.

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. No caso do quadro em liga de alumínio 6082 somente é 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. Para se validar o projeto do quadro do caminhão em

aço, que é o objeto de referência para se correlacionar com o quadro em liga de 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 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

Uma avaliação específica foi efetuada para se comparar os investimentos em ferramentais necessários para cada alternativa, aço e 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 foram os mesmos para ambos os casos, fixação por parafusos. O impacto do ganho de capacidade de carga paga (*payload*) a ser considerado factível foi transformado e projetado em termos de valor futuro, considerando-se uma vida útil do veículo de 5 anos. Os benefícios econômicos foram 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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados e discutidos baseados nos estudos relacionados com os 3 aspectos citados: análise mecânica estrutural por FEA, análise do processo produtivo pela produção em alumínio extrudado, análise do custo operacional pela maior capacidade de carga resultante.

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 escoamento do material, como pode ser observado na figura 3. 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.

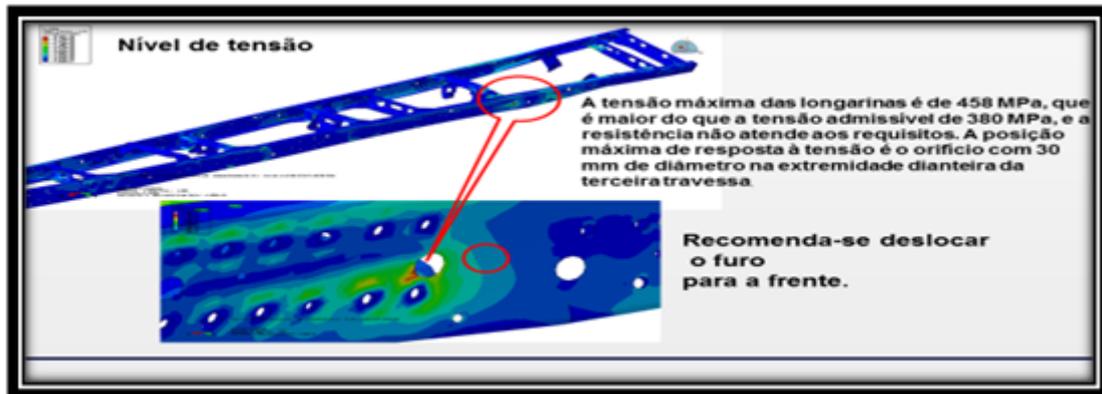


Figura 3: Região próxima ao furo indicando uma tensão superior à especificada para o material da longarina em aço LNE 380.

Esse resultado trouxe um momento de reflexão para a avaliação dos componentes, longarinas e travessas, com a liga de alumínio 6082, por ser estrutural e disponível, e que fossem produzidas por extrusão. Isso decorre do fato do 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 do ponto acima destacado. Com base nisto, foi feito o cálculo por FEA do mesmo quadro, agora com a liga de alumínio 6082. 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 1.

$$Resultado [\%] = (\sigma_{FEA} / \sigma_{esc.}) \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: σ_{FEA} é a tensão resultante e $\sigma_{esc.}$ é a tensão de escoamento.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades dos materiais considerados para os respectivos cálculos de FEA, ressaltando que os carregamentos foram sempre os mesmos, só se alterando o material.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos aços LNE 380 e LNE 500 e da liga de alumínio 6082.

Material	Modulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson	Tensão de escoamento	Deformação de Ruptura	Tensão de Ruptura
	E	V	σ_y	ϵ_{max}	σ_u
	[MPa]	[]	[MPa]	[%]	[MPa]
LNE 380	210.000,00	0,30	380,00	18,0	460,00
LNE 500	210.000,00	0,30	500,00	12,0	550,00
LIGA 6082 T6	70.000,00	0,33	260,00	8,00	310,00

Na figura 4 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 a geometria do quadro em aço foi mantida para o quadro em alumínio, somente 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.

Na simulação em condições do veículo em curvas foi onde a maior tensão foi observada, com mais de 100% acima da tensão de escoamento da liga de alumínio, como pode ser observado na figura 5. Nessa condição de carga, dois pontos se destacaram com níveis de tensões superiores à tensão de escoamento do material: região frontal com 111,2% 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.

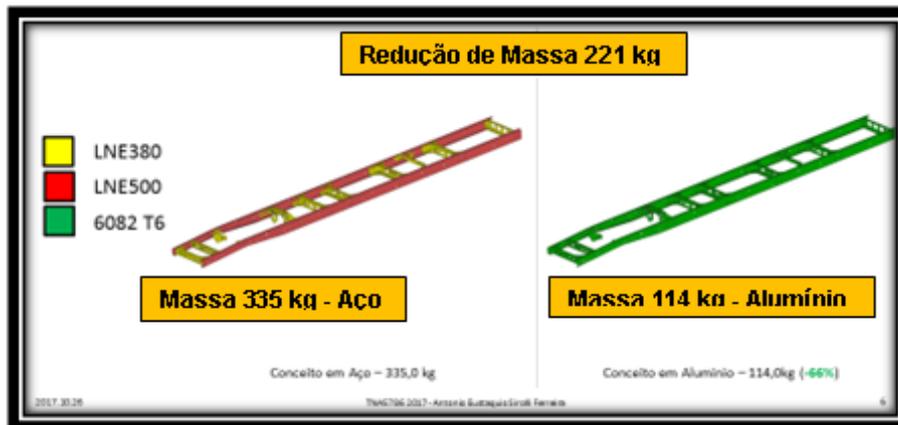


Figura 4: Definições básicas do quadro em aço e em alumínio.

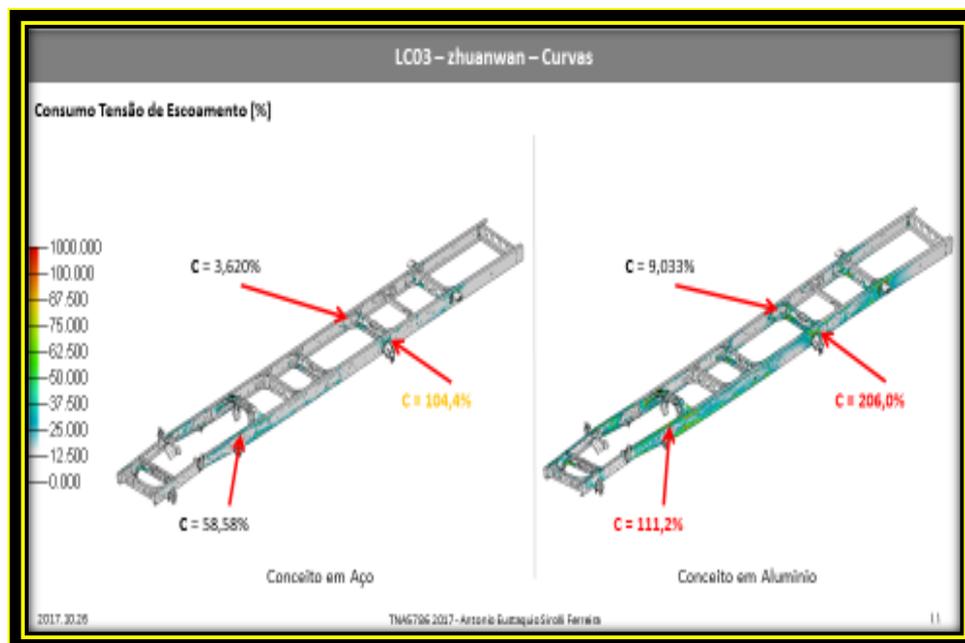


Figura 5: Níveis de tensões em curvas, região crítica indicada C=206,0%.

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 6 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. 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 apresentada na sequência, focando a redução potencial de massa de 150 kg.

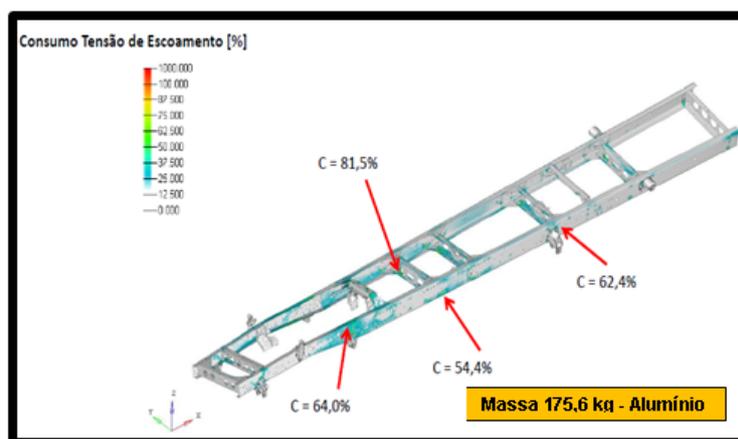


Figura 6: Níveis de tensões com espessuras aumentadas em 60%.

Os impactos produtivos, tanto em investimento como em adequação do projeto em liga de alumínio 6082 foram avaliados para atender o processo de fabricação por extrusão. O impacto no custo operacional e custo final do caminhão ao ser fabricado com o quadro esse material também foi analisado. No desenvolvimento do 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 em aço 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 de liga de 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 e 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. Na comparação dos custos totais dos ferramentais para atender os processos produtivos dos dois materiais em estudo tem-se: ferramental para o aço R\$ 4.500.000,00 e 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 também a complexidade do fluxo de material durante o processo produtivo das longarinas em aço. A sequência a seguir é meramente orientativa, para fornecer uma ideia básica na produção em aço: recortar o *blank* da longarina, estampagem do *blank* para conformar a longarina, estampar para criar a furação da longarina, estampar para calibração final das peças e como é em aço, pintar para evitar a corrosão. 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. O custo total em aço é de R\$ 2.179,85.

Para o quadro em liga de alumínio, levando-se em consideração a redução de massa potencial calculada, que foi considerada em 150 kg, isso se transformara em capacidade de carga paga adicional a ser transportada pelo caminhão, denominada de *payload*. Considerando-se uma massa a ser acrescentada ao caminhão na

ordem de 71 kg, esta deve ser estrategicamente localizada para adequar a rigidez e resistência nos pontos destacados pela análise por FEA. A introdução da liga de alumínio antes dos reforços resultava numa massa de 114 kg para o quadro, que pela análise mostrou-se insatisfatória para adequar a estrutura do quadro. Com isso o quadro em liga de alumínio deve ter uma massa total de 185 kg. Com um custo da liga de alumínio de R\$ 20,76/kg, o custo total do quadro na liga de alumínio 6082 será de R\$ 3.840,60. O impacto no custo no produto será de R\$ 3.840,60 - R\$ 2.179,85 = R\$ 1.660,75. Esse custo tem potencial de ser repassado ao preço do veículo, uma vez que esse impacto pode ser neutralizado pelo custo/benefício favorável ao quadro em liga de alumínio relativo aos 150 kg de *payload*.

O valor de mercado em julho/2018 desse veículo é de aproximadamente R\$ 150.000,00. Levando-se em consideração as vantagens operacionais na substituição do aço pela liga de alumínio 6082 devido ao aumento da capacidade de carga de 150 kg, é possível calcular o ganho num exemplo de produto de baixo valor agregado. Neste exemplo será adotado o transporte de latas de refrigerante de 350 ml e massa aproximada de 350 g. Com essa massa por lata será possível transportar 428 latas a mais por viagem do caminhão. Como cada lata tem um valor aproximado de R\$ 1,50, resultará numa receita a mais por viagem de R\$ 642,00. Considerando 22 viagens por mês, a receita adicional gerada será de R\$ 14.124,00. Supondo uma vida útil do caminhão de 60 meses tem-se uma receita nominal adicional de R\$ 847.440,00, que se for aplicada a 0,8% a.m. atinge R\$ 1.082.235,00 no mesmo período. Este valor equivaleria a 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.

CONCLUSÕES

O estudo da introdução da liga de alumínio 6082 extrudada em substituição aos aços ARBL no quadro do chassi do caminhão leve permitiu concluir que existem pontos críticos na estrutura do quadro do chassi em alumínio, que por meio de soluções específicas de reforço podem ser atenuados. Além disto, o nível de investimento para se produzir o quadro em liga de alumínio extrudada é substancialmente inferior ao em aço. Concluiu-se também que o custo operacional do caminhão com o quadro em alumínio, considerando um adicional de carga paga

de 150 kg é favorável ao quadro na liga de alumínio 6082. Quando considerado aspectos técnicos, produtivos e econômicos, os resultados mostram que é possível utilizar a liga de alumínio 6082 em substituição aos aços ARBL no quadro do chassi de caminhão leve.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. <http://tubarao.arcelormittal.com/pdf/produtos/catalogos/catalogo-acos-planos-america-sul.pdf> <Acesso em: 16/03/2018>
2. 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
3. www.mercedes-benz.com.br, <Acesso 01.04.2017>
4. www.man-la.com, <Acesso 01.04.2017>
5. www.fordcaminhoes.com.br, acesso em 01.04.2017

STRUCTURAL MECHANICAL ANALYSIS AND ECONOMIC FEASIBILITY IN THE REPLACEMENT OF HSLA STEELS BY THE 6082 ALUMINUM ALLOY IN FRAME OF TRUCK CHASSIS

ABSTRACT

The objective of the study is to evaluate a technical and economical alternative when modifying the frame of the chassis, which is made by HSLA (High Stress Low Alloy) steel by a drawing process, using the 6082 aluminum alloy obtained by the production process of extrusion, with consequent reduction of the mass of the frame. The results of the structural analysis indicate regions with high stress levels in the 6082 aluminum alloy frame, requiring reinforcement. The economic evaluations are favorable to aluminum alloy, mainly in low volume of production, when the investment required for the extrusion tool is significantly lower than that required to manufacture the steel chassis. Considering the operating cost, the advantage is even more significant for the additional freight carried which has been designed and valued for a product life of 60 months.

Keywords: aluminum alloys, FEA, chassis, frame, truck.