

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE AÇO OU ALUMÍNIO NOS
REQUISITOS DA SAE EM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO TIPO FÓRMULA**

São Caetano do Sul

2014

FERNANDO BOLLA LORA

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE AÇO OU ALUMÍNIO NOS
REQUISITOS DA SAE EM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO TIPO FÓRMULA.**

Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Automotiva, da Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Leonardo Macarrão

São Caetano do Sul

2014

Lora , Fernando Bolla

Estudo comparativo da utilização de aço ou alumínio nos requisitos da SAE em veículo de competição tipo Fórmula. / Fernando Bolla Lora. São Caetano do Sul, SP: CEUN-CECEA, 2014.

25p.

Monografia — Especialização em Engenharia Automotiva. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Juliana, pela compreensão e apoio durante todo o curso e pesquisa. Dedico também à General Motors e meu líder pela oportunidade e confiança em meu aperfeiçoamento técnico em benefício de meu crescimento e da empresa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade de viver cada dia da melhor forma possível e pela capacidade e habilidade de adquirir novos conhecimentos.

Aos docentes do curso de especialização em engenharia automotiva, por compartilhar seus conhecimentos e experiências durante o curso.

Aos familiares e colegas, pelo incentivo e apoio durante o tempo dedicado ao curso e a monografia.

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade estudar comparativamente o uso de aço e alumínio, conforme requisito SAE (*Society of Automotive Engineers*), em veículo de competição tipo Fórmula. Será analisado impactos em custo, massa, processo de fabricação e consequentemente, em desempenho e economia de combustível. A implantação do alumínio na estrutura de um veículo de competição tipo Fórmula poderá melhorar seu desempenho, uma vez que buscamos redução de massa mantendo as mesmas propriedades mecânicas quando comparadas uma estrutura em aço convencional, com no mínimo 0,1% de carbono, conforme exigido pela SAE. Este trabalho permitirá esclarecer qual o material mais vantajoso para ser utilizado na construção da estrutura de um veículo de competições tipo Fórmula e auxiliar estudantes, de instituições de ensino inscritas no evento, quanto a melhor escolha do material base de seus projetos de estrutura veicular.

Palavras-chave: Fórmula SAE. Estrutura Veicular. Materiais de Engenharia. Alumínio. Aço. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

This work aims to study compared the use of steel and aluminum, according to requirements of SAE (Society of Automotive Engineers), in competition vehicle type Formula. Impacts on cost, weight, manufacturing process and consequently in performance and fuel economy will be analyzed. The implantation of aluminum in the structure of a competition vehicle type Formula can improve your performance, since we seek to reduce mass while maintaining the same mechanical properties when compared to conventional steel structure, with at least 0.1% carbon, as required by SAE . This work will clarify the most advantageous material for use in building the structure of a vehicle type Formula competitions and assist students in educational institutions entered in the event, as the best choice of the base material of their vehicular structure projects.

Keywords: *Formula SAE. Vehicular Structure. Materials Engineering. Aluminum. Steel. Mechanical Properties.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de união do <i>Main Hoop</i> ao Monocoque.	14
Figura 2 – Corte do sistema de união do <i>Main Hoop</i> ao Monocoque	14
Figura 3 – Modelagem estrutural do Chassi.....	17
Figura 4 – Vistas Lateral e Superior do Chassi.....	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela com dimensões mínimas dos tubos de aço	12
Tabela 2 – Mínimo requisito para material alternativo, alumínio.	13
Tabela 3 – Características dimensionais do aço utilizado	15
Tabela 4 – Características dimensionais do Alumínio utilizado	16
Tabela 5 – Comparativo entre as formas de construção do Fórmula	18
Tabela 6 – Matriz de <i>Pugh</i> referente a processo	19

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
FSAE	Fórmula SAE
AL	Alumínio
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
IMT	Instituto Mauá de Tecnologia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 CONCEITO TÉCNICO DO FÓRMULA SAE	13
2.1 REQUISITOS SAE PARA VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO TIPO FÓRMULA	13
2.2 <i>MAIN HOOP</i>	14
2.3 FIXAÇÃO DO <i>MAIN HOOP</i> AO MONOCOQUE.....	14
2.4 <i>FRONT ROLL HOOP</i>	16
3 IMPACTOS NA MASSA.....	18
4 IMPACTOS NO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO E CUSTO	20
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	23
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

1 INTRODUÇÃO

A Sociedade dos Engenheiros Automotivos, SAE (*Society of Automotive Engineers*) criou em 1981, no Texas/EUA, um estilo de competição entre alunos de diferentes instituições de ensino superior em engenharia chamada Fórmula SAE.

A competição consiste em idealizar, projetar, desenvolver, construir um veículo de competições *on road* tipo Fórmula, dentro dos requisitos da SAE. Este veículo será a base de avaliação das equipes dentro da competição. A competição considera as seguintes etapas: Projeto, Custo e Marketing, que integram as avaliações das apresentações técnicas das equipes, e provas estáticas e dinâmicas tais como, prova de aceleração (pista de 75 metros), prova de estabilidade lateral, prova de frenagem, volta mais rápida em pista montada e enduro de resistência (22 km).

No Brasil esta competição foi criada em 2004 e vem crescendo a cada ano.

Os alunos têm como objetivo desenvolver e construir um veículo tipo Fórmula, seguindo regras estabelecidas pela SAE de forma a preservar a segurança dos participantes, de melhor performance e eficiência, adotando sempre inovações tecnológicas.

A estrutura do veículo de competição tipo Fórmula é um dos principais componentes do desenvolvimento, pois ela tem diferentes funções no veículo, desde prover a forma, prover pontos de fixação para os subsistemas do veículo e, principalmente, proteger o usuário/piloto em casos de acidentes e colisões.

Este trabalho trata justamente da estrutura do veículo de competição tipo Fórmula. Comparando diferentes materiais em sua construção e avaliando viabilidade técnica e financeira.

2 CONCEITO TÉCNICO DO FÓRMULA SAE

A SAE provê requisitos mínimos de segurança para o projeto e construção da estrutura do veículo tipo Fórmula. Toda avaliação comparativa levará em conta estes requisitos definidos nas regras da competição.

2.1 REQUISITOS SAE PARA VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO TIPO FÓRMULA

De acordo com a secção T3.3 da *FSAE rules 2014*, a SAE define algumas nomenclaturas para partes específicas da estrutura do veículo tipo Fórmula, conforme abaixo:

Main Hoop: Barra Calandrada sem emendas logo atrás do torso do piloto;

Front Hoop: Barra calandrada sem emendas logo acima das pernas do piloto, próximo ao volante de direção;

De acordo com a secção T3.4.1 da *FSAE rules 2014*, a SAE define mínimo requisito de material para o projeto e construção da estrutura do veículo tipo fórmula. O material primário que se deve ser utilizado é o aço em forma de tubos com no mínimo 0,1% de carbono em sua composição e com as dimensões mínimas conforme tabela abaixo:

Tabela 1: Tabela com dimensões mínimas dos tubos de aço

ITEM ou APLICAÇÃO	SEÇÃO DO TUBO - DIMENSÕES EXTERNAS X ESPESSURA DE PAREDE
<i>Main & Front Hoop</i>	Seção Circular - 25,4 mm x 2,4 mm, ou Circular - 25,0 mm x 2,50 mm
Estrutura de Impacto Lateral, braços do <i>Roll Hoop</i> , suporte de fixação do cinto de segurança	Seção Circular - 25,4 mm x 1,65 mm, ou Circular - 25,0 mm x 1,75 mm, ou Circular - 25,4 mm x 1,60 mm, ou Quadrada - 25,0 mm x 25,0 mm x 1,25 mm, ou Quadrada - 26,0 mm x 26,0 mm x 1,2 mm
Suporte dos braços do <i>Main Hoop</i>	Seção Circular - 25,4 mm x 1,25 mm, ou Circular - 25,0 mm x 1,50 mm, ou Circular - 26,0 mm x 1,20 mm

Fonte: Adaptado de Formula SAE Rules website.

De acordo com a secção T3.5 da *FSAE rules* 2014, a SAE define alternativas gerais de material a ser utilizado no projeto e construção da estrutura do veículo tipo Fórmula, exceto para o *Main Hoop* que deverá ser projetado e construído em aço carbono (com no mínimo 0,1% de carbono) e com dimensões mínimas, conforme figura 1 acima.

Para as demais partes que formam a estrutura do veículo tipo Fórmula escolhemos como objeto de estudo o alumínio como material alternativo, que possui seus requisitos mínimos explicitados conforme secção T3.7 da *FSAE rules* 2014:

Tabela 2: Mínimo requisito para material alternativo, alumínio.

Material Alternativo	Mínima espessura de parede
Liga de Alumínio	Tubo de Alumínio: 3,0 mm (0,118 inch)

Fonte: Adaptado de Formula SAE Rules website.

2.2 MAIN HOOP

A construção do *Main Hoop* deve seguir alguns critérios específicos determinados pela SAE Brasil de acordo com FSAE Rules 2014. Ele deve ser construído sem cortes e emendas, ou seja, com material contínuo e de seção fechada (tubos metálicos). O principal requisito para a construção do *Main Hoop* é o material. É proibido o uso de material alternativo nesta estrutura, sendo o único material permitido o Aço Carbono (mínimo de 0,1% de carbono) com as seguintes dimensões: 25,4 mm (diâmetro externo) x 2,4 mm (parede do tubo).

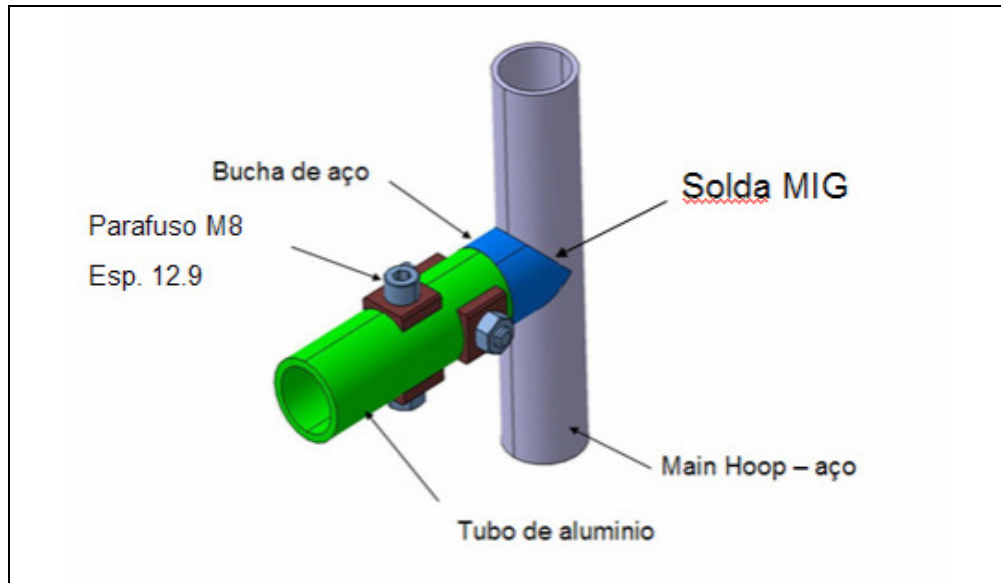
Por se tratar de uma parte da estrutura que não permite a modificação do material, não iremos realizar o estudo comparativo para o *Main Hoop*.

2.3 FIXAÇÃO DO MAIN HOOP AO MONOCOQUE

A união do *Main Hoop* ao restante do veículo (monocoque) deverá ser feita de formas mecânica e química, porcas e parafusos e cola, pois estaremos unindo partes do veículo construídas com materiais diferentes, ou seja, o aço carbono do *Main Hoop* e o alumínio do Monocoque.

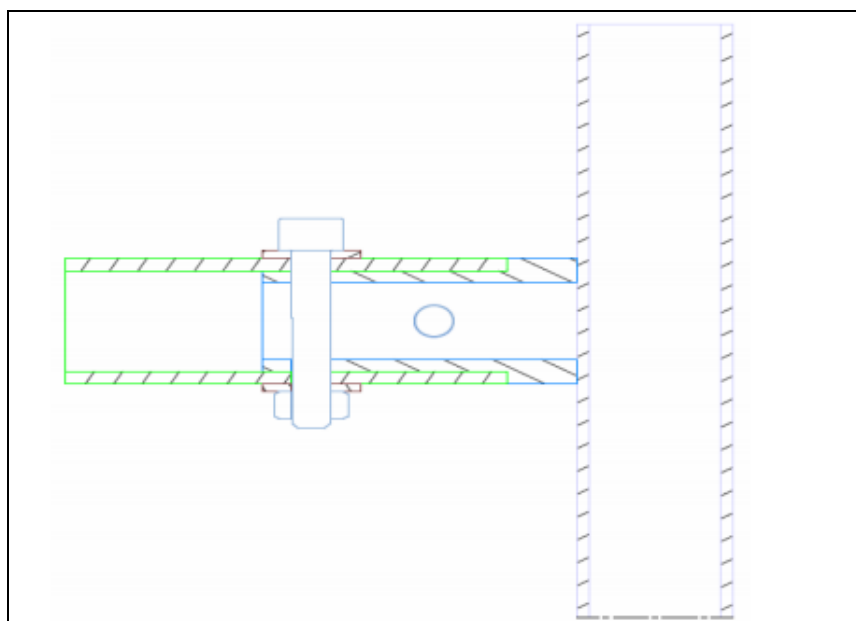
A solução encontrada foi a utilização de buchas de aço carbono soldadas no *Main Hoop* e parafusadas e coladas aos tubos de alumínio, feitas com as mesmas especificações dos tubos utilizados no *Main Hoop*, conforme figura abaixo do projeto feito pela equipe Mauá Racing no Fórmula SAE Brasil de 2006:

Figura 1: Esquema de união do *Main Hoop* ao Monocoque.



Fonte: Adaptado do relatório técnico Equipe Mauá Racing 2006.

Figura 2: Corte do sistema de união do *Main Hoop* ao Monocoque



Fonte: Adaptado do relatório técnico Equipe Mauá Racing 2006.

2.4 FRONT ROLL HOOP

O *Front Roll Hoop* será a base para o estudo comparativo de material alternativo ao aço, que no caso é proposto o alumínio. O cálculo das propriedades será baseado neste subsistema importante de um veículo de competição tipo Fórmula, pois se trata do subsistema com requisitos mais apertados da estrutura.

De acordo com a *FSAE Rules 2014*, o material recomendado para este subsistema é o Aço carbono com o mínimo 0,1% de carbono e dimensões mínimas de 25,4 mm (diâmetro externo) x 2,4 mm (parede do tubo).

Baseando-se nestes requisitos podemos calcular algumas propriedades do material (aço carbono) que ao fim do trabalho será comparado com as mesmas propriedades do material alternativo (alumínio).

Tabela 3: Características dimensionais do aço carbono utilizado

Aço Carbono	SAE 1020
Diâmetro Externo	25,4 mm
Parede (conforme requisitos SAE)	2,4 mm

Produto EI para Aço Carbono com 0,1% C (Tubo de seção circular)::

Módulo de Elasticidade do aço (E) = 207.000 Mpa

Momento de Inércia (I) – (Dim: 25,4mm x 2,4mm) = 11586,11 mm⁴

Produto ExI (EI) = 2,4. 10⁹ Mpa.mm⁴

Baseando-se na utilização que faremos ao material alternativo alumínio e também no fato de que, na construção do *Front Roll Hoop* e demais partes da estrutura do veículo tipo Fórmula, utilizaremos o processo de soldagem, optamos por selecionar um alumínio da série 6XXX pois possuem excelente resistência e uma ótima soldabilidade.

A liga de alumínio da série 6XXX mais facilmente encontrada no Brasil é o 6061. Desta forma seguiremos com o restante da estrutura formada por tubos de liga de alumínio 6061.

Tabela 4: Características dimensionais do Alumínio utilizado.

Alumínio	6061 T6
Diâmetro Externo	31,75 mm
Parede (conforme requisitos SAE)	4,3 mm

Produto EI para Alumínio 6061 T6 (Tubo de seção circular):

Módulo de Elasticidade do alumínio (E) = 70.000 Mpa

Momento de Inércia (I) – (Dim: 31,75mm x 4,3mm) = 35765,44 mm⁴

Produto EI (EI) = 2,5. 10⁹ Mpa.mm⁴

Quando comparamos o produto EI do aço e do alumínio notamos, nestas condições, que o alumínio gerou um EI 4,5% maior que mínimo EI determinado e a parede selecionada satisfaz a utilização.

Desta forma, temos que a estrutura do veículo tipo Fórmula será composto de tubos de aço 1020 com dimensões 25,4 mm (diâmetro externo) x 2,4 mm (parede do tubo) e tubos de alumínio 6061 T6 com dimensões 31,75 mm (diâmetro externo) x 4,3 mm (parede do tubo).

3 IMPACTOS NA MASSA

Uma vez constatado, no capítulo anterior, a viabilidade técnica de se utilizar alumínio em uma estrutura de veículos tipo Fórmula, vamos agora encontrar uma maneira de determinar a massa de um veículo construído em 100% aço e compará-lo a a massa de um veículo construído em Alumínio e Aço (nas partes mandatórias conforme requisito SAE).

Figura 3: Modelagem estrutural do Chassi.

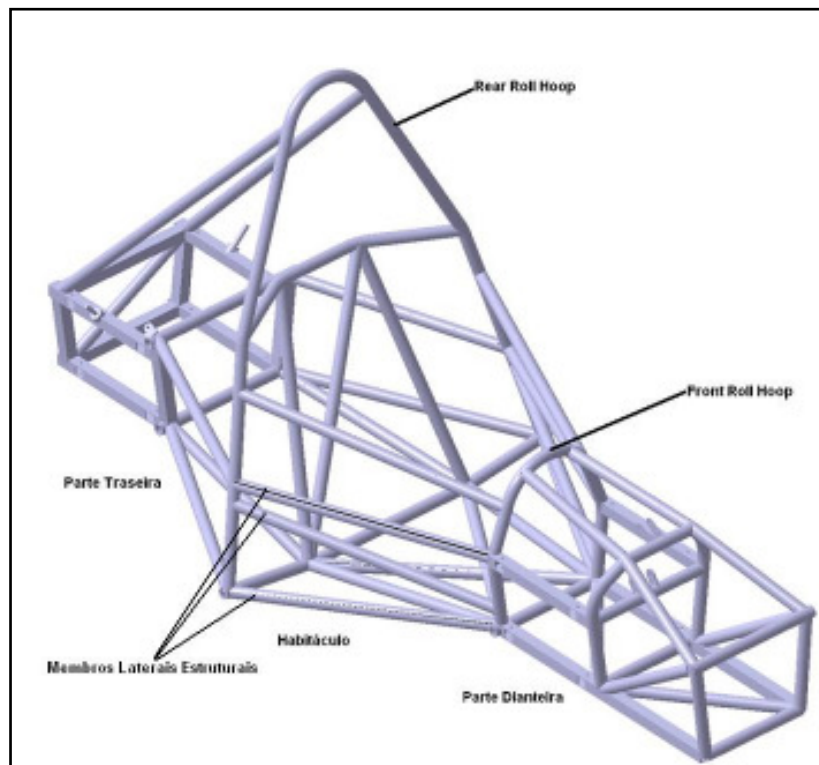
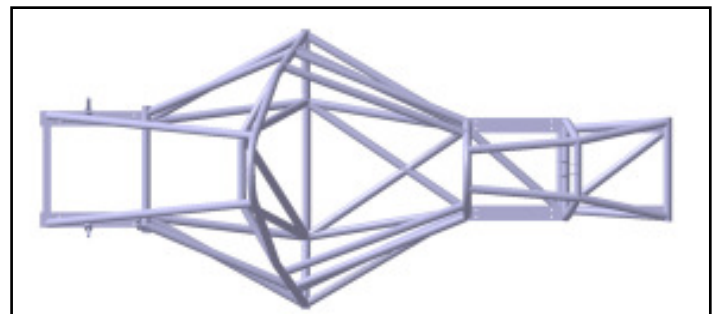
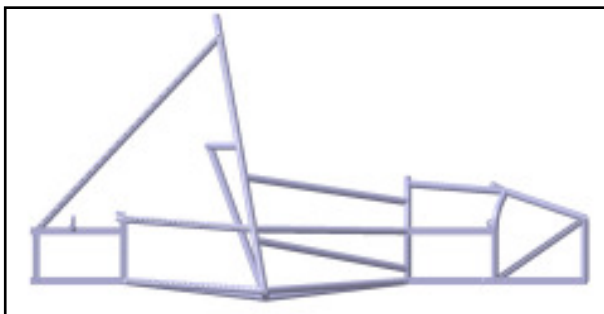


Figura 4: Vista Lateral e Superior do Chassi



Fonte: Adaptado do relatório técnico Equipe Mauá Racing 2006.

O Chassi de um veículo de competição tipo Fórmula tem em média 59 tubos metálicos em sua composição.

Segue abaixo, uma tabela contendo o comparativo de massa e custo entre um veículo construído em 100% de aço carbono 1020, doravante chamado de Chassi de Aço, e um veículo construído em 90% alumínio 6061 T6 e 10% de aço carbono 1020 (10% é referente a construção do *Main/Rear Roll Hoop* que é obrigatório ser em aço carbono, conforme regra da competição SAE), doravante chamado de Chassi de Alumínio.

Tabela 5 – Comparativo entre as formas de construção do Fórmula

Material	Chassi de Aço	Chassi de Alumínio
Módulo de Elasticidade	210 GPa	69 GPa
Índice de Poisson	0,29	0,33
Densidade de Massa	7,84 g/cm ³ - AÇO	2,71 g/cm ³ - AL 7,84 g/cm ³ - AÇO
Massa Total	290 Kg	240 Kg onde, 24 Kg Aço e 216 Kg AL

Conforme dados da Tabela 4, temos que a utilização do Alumínio na construção de um veículo de competição tipo Fórmula reduz em 17,2 % a massa da estrutura (50 Kg), gerando impactos positivos no desempenho do veículo em algumas das provas a serem disputadas na competição da SAE, como as de aceleração e enduro. Porém a redução de massa não impactará no desempenho das demais provas onde a aceleração não é o fator mais importante, como por exemplo, prova de segurança (frenagem e estabilidade lateral). Os valores de massa foram obtidos experimentalmente – Chassi de Aço no veículo Fórmula do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) de 2012 e Chassi de Alumínio no veículo Fórmula do IMT de 2006.

4 IMPACTOS NO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO E CUSTO

A construção de um veículo de competição Fórmula SAE demanda muita dedicação e tempo dos membros da equipe. A escolha do material pode interferir na forma como a equipe irá trabalhar de modo a atender *timing* do programa e diminuir riscos de *roadblocks* durante a execução das tarefas.

A utilização, especificamente, do alumínio na estrutura de um veículo deste tipo, onde todo processo de construção é feito artesanalmente, traz alguns benefícios e também algumas complicações, quando comparado com aço carbono, que serão detalhadas na Matriz de Pugh abaixo:

Tabela 6 – Matriz de *Pugh* referente a processo

Matriz de <i>PUGH</i>	Material Alumínio (PROPOSTA)	Material Aço (DATUM)
SOLDABILIDADE	- - -	+
UTILIZAÇÃO EM PROCESSOS DE FABRICAÇÃO (FURO, LIMA, ETC.)	+	-
UNIÃO COM DIFERENTES METAIS	-	+
CUSTO	- - -	+

A Sociedade Americana de Soldagem (AWS) tem por definição que soldabilidade é a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço.

Aços de baixo carbono (Aço 1020), como é o caso do material utilizado como *DATUM* na matriz acima, são os materiais mais utilizados para construção e fabricação em qualquer ramo

da indústria, pois se tratam de materiais resistentes e de grande facilidade de soldar por qualquer tipo de solda, MIG, TIG etc. Basta selecionar o mais adequado eletrodo/metal de adição para cada aplicação e método de soldagem.

O alumínio possui algumas características específicas que levam a uma dificuldade maior, quando comparado ao aço, no processo de soldagem. Essas características estão intrínsecas às suas propriedades, conforme abaixo:

- Alta afinidade com o Oxigênio;

Essa reação com oxigênio forma uma camada de óxido que altera o ponto de fusão do material de 660°C para aproximadamente 2000°C. Essa camada gera um bloqueio que impede a mistura do metal de adição ao metal base.

- Alta condutividade térmica;

Com a condutividade térmica alta, o calor necessário para a soldagem se dissipa mais rapidamente que no aço, reduzindo a eficiência de soldagem.

- Alto coeficiente de dilatação térmica;

A dilatação do alumínio é aproximadamente duas vezes maior que no aço, aumentando a probabilidade de distorção da peça e aparecimento de trincas.

- Baixo ponto de fusão;

Dificuldade no controle de temperatura durante o processo de soldagem.

O alumínio possui uma característica que facilita muito o trabalho artesanal durante a construção do Fórmula SAE. Ele é um material maleável o que facilita algumas operações durante a construção do veículo, tais como, furação, desbaste, corte, dobra etc, dos tubos na forma e dimensão necessária para formação da estrutura do veículo conforme projeto.

O alumínio também tem uma característica que na aplicação do fórmula, nos afetou muito. Não é possível fazermos a união do alumínio no aço carbono, pois o *Main Roll Hoop* é obrigatório ser em aço, através de solda. Desta forma, utilizamos uma solução de bucha, o que gerou trabalho adicional e a necessidade de comprovar a resistência alcançada com esse tipo de união. É possível observar detalhes desta solução na figura 1.

O custo do material alumínio é maior quando comparado ao aço carbono comum (SAE 1020). O elevado custo do alumínio se dá por questões de mercado e pelo complexo processo de obtenção da matéria.

Em média, o alumínio 6061 T6 é quatro vezes mais caro que o Aço Carbono 1020, por unidade de massa (kg).

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Com base em toda análise feita durante este trabalho, temos que tecnicamente o alumínio é viável e atende o mínimo requisito exigido pela SAE na competição do Fórmula.

A redução de massa em 17% é significativa, porém no dia da competição, essa redução não fará diferença à equipe pois a única prova que será beneficiada é a de aceleração, onde a equipe Mauá Racing conquistou o recorde brasileiro de aceleração em 2006, ou seja, a redução de massa traz benefícios mas não suficientes para influenciar no desempenho da equipe na competição. Mesmo com o record brasileiro e pontuação máxima em aceleração, a Equipe Mauá Racing ficou em quarto lugar na pontuação geral da competição.

Com base nos custos estudados pelo time de Engenharia de Estimativa de Custos da General Motors do Brasil, temos que o custo do tubo de alumínio 6061 T6 (R\$17,00/Kg) é 431,25% mais elevado que o tubo de Aço Carbono 1020 (R\$3,20/Kg), fazendo com que dificulte a implementação deste material em equipes cuja instituição a que ela pertence não possui recursos para subsidiar 100% do projeto, compra de materiais e da construção do veículo tipo Fórmula.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Concluo que, desta forma, a utilização do alumínio na construção da estrutura/chassi de um veículo de competição tipo Fórmula, especificamente para competições organizadas pela SAE não é vantajosa pelos seguintes fatos:

- O ganho em massa não favorece a performance geral do veículo na competição da SAE;
- O custo ao se utilizar alumínio 6061 T6 é significativamente superior ao do aço carbono 1020 (431,25% superior) inviabilizando financeiramente o projeto, que quase sua totalidade é subsidiado pelas instituições financeiras das equipes participantes;
- Elevará o nível de complexidade da construção da estrutura por conta de dificuldades de soldagem e interface com outros materiais necessários para consolidação do chassi;

Apesar de ser tecnicamente viável implementar alumínio como material do chassi, a recomendação às equipes e instituições participantes da atividade extra-curricular e evento promovido pela SAE, é de não utilizar alumínio na construção do veículo de competição tipo Fórmula da SAE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMIAN, Rupen. **Novos Materiais, Tecnologias e Aspectos Econômicos** / COPPE/UFRJ. – Brasil 2009.

Materials concepts in automotive engineering. Warrendale-USA. TMS. 2005. :27-146. in: Simp.Int.m 2005. International Symposium on Niobium Microalloyed Sheet Steel for Automotive Applications. Araxá MG Br.

NUNES, Laerce de Paula. **Materiais – Aplicações de Engenharia, Seleção e Integridade** / Interciência. - Brasil 2012.

SAE International – Society of Automotive Engineers. **FSAE Rules.** Disponível em: <<http://www.fSAEonline.com/content/2014%20FSAE%20Rules%20Final%208192013.pdf>>. Acesso em 21 de novembro de 2013.

SAE Brasil – Society of Automotive Engineers. **What is it?.** Disponível em: <http://www.SAEbrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/ingles/formula2013/formula.aspx>. Acesso em 28 de outubro de 2013.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos** / Edgard Blucher. – Brasil 1982.

TEIXEIRA, Anderson Kreischer; NUNES, Laerce de Paula. **Introdução à Metalurgia e aos Materiais Metálicos** / Interciência. – Brasil 2010.