

# PROJETO DE MONOCOQUE PARA VEÍCULO FORMULA SAE UTILIZANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

**Flávio Henrique Galetti Storto**

fhenriquegs@gmail.com

**Resumo.** O projeto preliminar de um monocoque de fibra de carbono de matriz polimérica é realizado utilizando uma estrutura do tipo sanduíche. O projeto é baseado nas regras da competição Formula SAE de 2011 por meio de cálculos analíticos. Uma sequência de laminação é definida por meio desses cálculos, e posteriormente uma geometria básica para o monocoque é desenhada. O projeto final possui massa estimada de 16,6 kg, uma redução de 27,8% quando comparado com uma estrutura equivalente de aço. Apesar de uma análise própria de rigidez torcional não ter sido desenvolvida, análises preliminares utilizando o Método de Elementos Finitos mostraram que a rigidez de uma estrutura sanduíche é uma ordem de grandeza mais rígida do que uma estrutura similar treliçada de tubos de aço. Apesar do aumento de custo proveniente da abordagem de compósitos e das complicações tecnológicas, o projeto se mostrou viável do ponto de vista de desempenho e do ponto de vista técnico.

**Palavras chave:** Materiais compósitos, Engenharia automotiva, Veículos de competição.

## 1. Introdução

A equipe de Fórmula SAE da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP/USP) utiliza uma estrutura treliçada tubular como carroceria para seus protótipos de competição. Tal estrutura vem mostrando limitações quanto à configuração geométrica, seu peso e sua rigidez, o que compromete o desempenho do veículo.

De acordo com as tendências evidentes para a indústria de competição, este Trabalho de Formatura é uma tentativa de se desenvolver uma carroceria preliminar tipo monocoque para o veículo protótipo de competição da Equipe de Fórmula SAE da EP/USP. Tal desenvolvimento deve respeitar as regras da competição, que visam principalmente a segurança, enquanto maximiza o desempenho do veículo. O objetivo deste Trabalho é desenvolver uma carroceria preliminar tipo monocoque para a equipe de Fórmula SAE da EP/USP. As especificações principais desta carroceria dizem respeito ao seu desempenho e à qualidade, enquanto se mantém praticável dentro do contexto da Fórmula SAE.

## 2. Estudo de estruturas treliçadas e monocoque

A estrutura do veículo serve de suporte aos seus diversos subsistemas, como suspensão e transmissão, e deve suportar esforços externos e internos. Esforços externos são aqueles originados da interação entre este e o ambiente, por exemplo forças aerodinâmicas ou forças de interação pneu-solo. Esforços internos são aqueles originados por componentes embarcados ao veículo, como o torque transmitido pelo motor aos seus suportes.

Essa estrutura pode ter três configurações:

1. *Treliçado (Frame ou space frame):* são estruturas separadas do veículo, como ocorre em veículos industriais e veículos fora de estrada. Normalmente possuem um aspecto de estrutura treliçada, tubulares ou não, e eram muito utilizados em carros esportivos e de competição até a década de 1970 devido à sua simplicidade e facilidade de construção. Uma estrutura desse tipo está ilustrada na Figura 1a.
2. *Monocoque (ou monobloco):* são estruturas integradas ao veículo, como é o caso da maioria dos veículos de passeio hoje em dia, e está ilustrado na Figura 1b. São de fabricação mais complexa mas permitem uma distribuição melhor dos fluxos de carga, o que aumenta a rigidez enquanto reduz o peso.

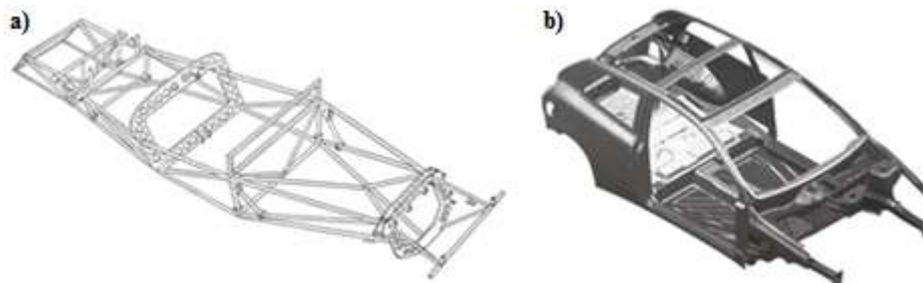


Figura 1 – a) Estrutura treliçada de um veículo Lotus 19 e b) monocoque de veículo de passeio. Adaptado de Costin & Phipps (1961) e de Genta & Morello (2009) .

Estruturas monocoque são muito utilizadas no setor automotivo pela sua facilidade de produção em série. São utilizadas folhas metálicas conformadas de acordo com a necessidade, de modo que o maior custo envolvido está no ferramental (molde) utilizado para a manufatura. Uma vez feito o ferramental, várias unidades podem ser produzidas. A estrutura treliçada, ao contrário, é mais facilmente adaptada a uma produção pequena, como é o caso da Fórmula SAE. O processo de soldagem de uma estrutura treliçada é mais barato do que a criação do ferramental para estruturas monocoque, além de ser mais simples. O processo fica mais caro na medida que mais unidades são produzidas, o que torna esta solução impraticável no mercado de automóveis de passeio.

Para carros de Fórmula SAE, de maneira geral, são encontrados três tipos básicos de estruturas:

1. *Treliçado comum.*
2. *Monocoque completo.*
3. *Híbrido monocoque-treliçado.*

A Figura 3 mostra a estrutura treliçada utilizada pela Equipe de Fórmula SAE da EP/USP em seu protótipo FP-02MA, produzido para a competição brasileira de 2010. Os custos da manufatura da estrutura treliçada do FP-02MA estão discriminados na Tabela 1, de onde pode ser observado que o custo da estrutura possui um valor relativamente baixo. O projeto da estrutura do FP-02MA foi realizado com o objetivo de minimizar as deflexões, de modo que o projeto de suspensão pudesse ser realizado isoladamente. Um chassi pouco rígido também compromete as fixações de seus componentes, e atrapalha o processo de ajuste do carro (também conhecido como tuning ou set-up). A Tabela 2 mostra a rigidez torcional da estrutura obtida através de Análise de Elementos Finitos. Nesta simulação, os tubos foram modelados utilizando elementos de viga (BEAM4, no pacote Ansys Multiphysics 12.0.0.1), com a traseira do carro fixa e um binário aplicado na dianteira que passa pela suspensão do carro. A suspensão foi modelada utilizando elementos rígidos. A Tabela 2 também inclui o valor objetivo de rigidez torcional, que depende da rigidez de rolagem da suspensão e da distribuição de massa do veículo. O valor objetivo foi obtido à partir do método introduzido em Ericsson (2008). A massa da estrutura está discriminada na Tabela 3. Como pode ser visto, a massa da estrutura corresponde à uma parcela significativa (18,7%) da massa total do veículo, que é igual a 191,5 kg (peso seco – sem fluidos – e sem piloto).

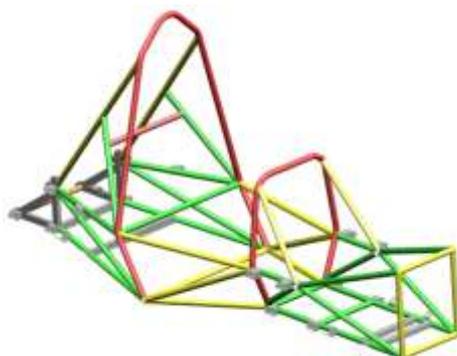


Figura 3 – Estrutura tubular treliçada em modelo CAD do protótipo FP-02MA.

Tabela 1 – Discriminação dos custos de fabricação da estrutura do FP-02MA

Tubos	Solda	Clévis	Gabarito	Total	Total do veículo
R\$ 290,00	R\$ 216,00	R\$58,00	R\$ 40,00	R\$ 604,00	R\$ 21.028,87

Tabela 2 – Rigidez torcional e valor objetivo de rigidez da estrutura treliçada tubular do FP-02MA (obtidos em Análise de Elementos Finitos)

Rigidez torcional na dianteira	Entre-eixos	Distância do CG ao eixo dianteiro	Distribuição de peso	Rigidez de rolagem da suspensão	Valor objetivo de rigidez da estrutura
(Nm/grau)	(mm)	(mm)	(% na dianteira)	(Nm/grau)	(Nm/grau)
1474,6	1540	789,3	51,3%	346,5	> 1400

Tabela 3 – Tabela de massa da estrutura do FP-02MA.

Massa dos tubos	Massa da solda	Massa dos clévis	Massa total da estrutura	Massa total do veículo	Contribuição à massa total
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)
24,6	9,6	1,7	35,9	191,5	18,7%

A princípio, as principais vantagens, sob o ponto de vista da Fórmula SAE, de uma estrutura monocoque sobre uma estrutura treliçada são:

1. Melhor relação rigidez-massa.
2. Maior facilidade de posicionamento dos componentes, devido à maior liberdade geométrica.

Em contrapartida, à princípio, as principais desvantagens, também sob o ponto de vista da Fórmula SAE, de uma estrutura monocoque sobre uma estrutura treliçada são:

1. Maior complexidade, tanto de projeto quanto de manufatura.
2. Menor versatilidade, pois não permite facilmente adaptações uma vez que esteja construído.
3. Maior custo de produção.

As três desvantagens aqui apresentadas são normalmente limitantes muito importantes do ponto de vista de uma equipe de Fórmula SAE, uma vez que os estudantes são em geral inexperientes e a equipe normalmente carece de recursos suficientes. Uma vez que os estudantes da equipe ganhem mais experiência, e portanto sejam capazes de desenvolver um projeto confiável, ainda que complexo, e a equipe cresça do ponto de vista financeiro, tais desvantagens podem se tornar inconvenientes menores.

### 3. Escopo

Como o objetivo principal do projeto é desenvolver um monocoque de materiais compósitos laminados poliméricos, algumas características básicas são determinadas, de modo a definir o escopo do projeto.

1. Construção dos protótipos: não faz parte do escopo deste projeto a construção do protótipo, mas a manufatura deste deve ser levada em consideração ainda na fase de projeto de modo a possibilitar sua realização futura.
2. Tipo de material: serão utilizados materiais compósitos laminados de matriz polimérica, tipo sanduíche, que é o tipo utilizado nos monocoques de competição profissional. Esse tipo de construção provê o maior ganho em rigidez e estabilidade estrutural, com o menor aumento em densidade do laminado, como será mostrado adiante.
3. Tipo de processo: por ser um componente estrutural primário no veículo, a manufatura do monocoque deve seguir práticas e métodos consolidados para este tipo de aplicação. Laminação manual com utilização de pincéis para impregnação não será utilizada pela dificuldade em se obter características mecânicas satisfatórias.
4. Tipo de monocoque: o monocoque deve ser do tipo híbrido, o que implica que apenas a parte dianteira do veículo será de material composto. A produção de um monocoque completo requer que todos os subsistemas estejam preparados para a implementação do monocoque, o que não é o caso.
5. Componentes periféricos e subsistemas: com o projeto do monocoque, os componentes que são anexados à ele devem ser reprojatados, especialmente em termos de suas fixações e acondicionamento. Estes componentes não serão desenvolvidos neste projeto.

### 4. Estudos preliminares

#### 4.1. Configuração geométrica

O monocoque em carros de corrida é comumente chamado de “célula de sobrevivência”, visto que deve proteger o piloto em situação de acidente. Monocoques de corrida em geral possuem algumas seções que servem a este propósito:

1. Anteparo frontal (front bulkhead).
2. Aro de capotamento frontal (front roll hoop).
3. Aro de capotamento principal (main roll hoop).
4. Estrutura de impacto lateral (side impact structure).

Todas essas seções têm características regulamentadas para a Formula SAE. Tanto a Formula 1 quanto a Formula SAE possuem um atenuador de impacto frontal, que não faz parte do monocoque, de modo que um impacto frontal sacrifica este atenuador frontal, sem danificar o monocoque em si. A Formula 1 possui um atenuador traseiro, que não é exigido na Formula SAE.

O monocoque deve acomodar todos os componentes do veículo, de modo que se faz necessário definição de envelopes de componentes. Alguns outros envelopes, estipulados por regra (FSAE 2011), também devem ser respeitados.

- Envelope de freio: os componentes internos (pedais, cilindros-mestres e suportes) dos freios ficam anexados ao assoalho do monocoque. Com base no projeto do veículo de 2010, é possível prever um envelope para esses componentes de acordo com a Figura 4a.

- Atenuador de impacto frontal: apesar de não fazer parte do monocoque, o atenuador de impacto deve ser menor do que o anteparo frontal, para que seja possível acondicionamento. O atenuador de impacto a ser utilizado segue a geometria descrita na Figura 4b, onde as medidas estão em milímetros.

- Piloto: o piloto a ser utilizado é baseado no banco de dados ANSUR 1988, a partir de um ser humano percentil 5% tanto em massa quanto altura, o que corresponde a um piloto de 1646,9 mm de altura e 61,6 kg. Quanto menor o piloto, menor o monocoque de modo que sua massa é reduzida. Além disso a massa do piloto influencia na dirigibilidade do veículo, de modo que uma menor massa aumenta o desempenho final.

- Motor: o motor a ser utilizado será o WR 450, assim como foi utilizado nos anos anteriores de competição. Esse motor foi digitalizado e é ilustrado na Figura 4c.

- Envelopes regulamentados: os artigos B4.1 e B4.2 da regra de 2011 determinam dois envelopes os quais o monocoque deve respeitar para garantir a segurança do piloto em uma emergência.

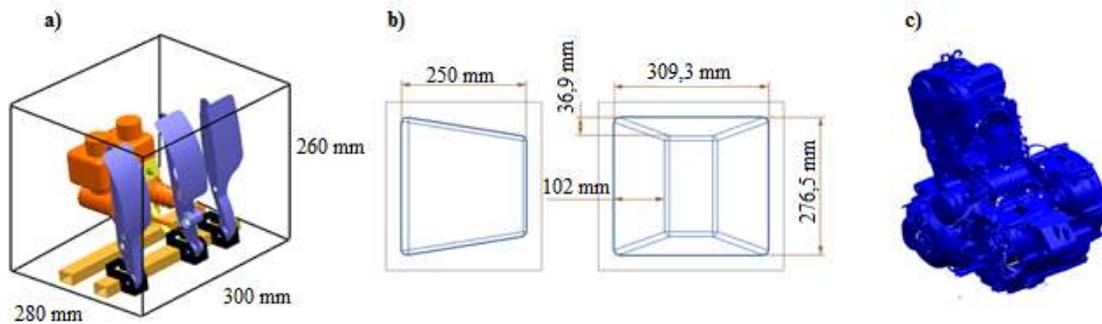


Figura 4 – Envelopes de a) Freio, b) Atenuador de Impacto e c) motor.

#### 4.2. Processo de fabricação

No que diz respeito ao processo de fabricação, manufatura de monocoques compostos é normalmente realizada através de duas técnicas, quais sejam: laminação com material pré-impregnado em autoclave, e infusão à vácuo.

Na primeira, as laminas de fibra de carbono são pré-impregnadas com a matriz polimérica na fração de volume desejada, e a cura é posteriormente realizada em uma autoclave, com pressão e temperatura controladas. A fibra pré-impregnada é chamado de prepreg, e é mantida em refrigeradores de condição controlada para evitar a cura prematura da matriz. Este procedimento é o que leva à melhores características mecânicas dos componentes, pois reduz a possibilidade de defeitos (como bolhas e impurezas), e o nível de impregnação da matriz na fibra é altamente controlável. Apesar disso, o material é custoso e o manuseio requer cuidado. A laminação deve ser feita em uma sala limpa para evitar a contaminação do prepreg.

O processo de laminação em autoclave será considerado no projeto.

#### 4.3. Material do núcleo

Os materiais de núcleo são vendidos em diversas formas. Os principais são colméia, espuma, extrudados e compensados. O que diferencia as diferentes configurações são suas propriedades mecânicas e o processo de fabricação, o que influencia finalmente no custo. A Tabela 4 mostra um comparativo entre os diferentes tipos, e as medidas são normalizadas em relação à colméia.

Tabela 4 – Comparativo de resistência e rigidez entre vários tipos de núcleos (Fonte: *Honeycomb sandwich design technology*, Hexcel 2010)

	Resistência relativa à colméia	Rigidez relativa à colméia
Colméia	1	1
Espuma	0,26	0,68
Extrudados	0,62	0,86
Compensados	0,03	0,17

Dessa forma, a configuração em colméia possui as melhores propriedades mecânicas quando comparado com as outras três configurações. Os materiais mais utilizados para colméias são alumínio e aramida. Um comparativo de resistência e rigidez pode ser encontrado na Figura 5. Em vermelho estão destacados colméias de alumínio, e em verde as colméias de aramida. As colméias de alumínio são mais resistentes e mais rígidas para qualquer densidade de colméia. A diferença em rigidez é maior do que a diferença em resistência.

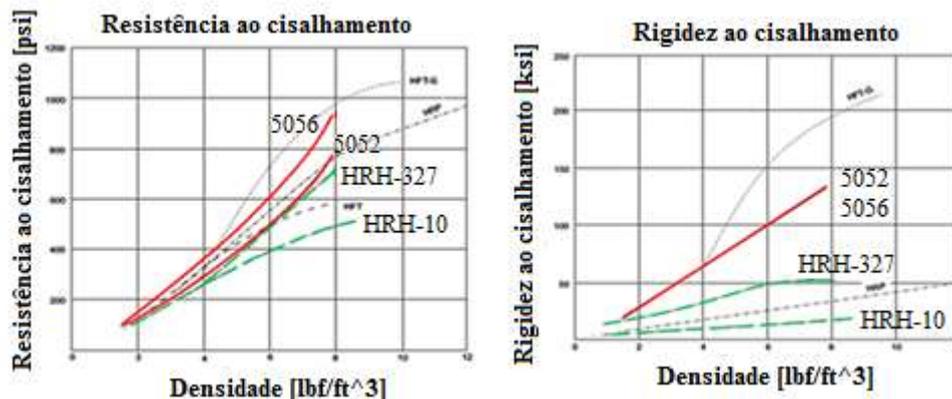


Figura 5 – Resistência e rigidez ao cisalhamento em função da densidade para diversos materiais de núcleo. Em verde aramidas. Em vermelho, alumínio. (Fonte: *Honeycomb sandwich design technology*, Hexcel 2010)

#### 4.4. Material das lâminas

As fibras de carbono podem ser separadas em quatro categorias de acordo com os fornecedores de fibras: alta resistência, módulo intermediário, alto módulo e ultra-alto módulo. Tais categorias advêm da obtenção do filamento de carbono a partir de seus precursores (como o poliácilonitrila), e se relacionam com a intensidade de tratamento térmico que é dispensado ao precursor. De modo geral, quanto maior a intensidade do tratamento térmico, maiores as propriedades mecânicas em termos de resistência e módulo. As categorias citadas acima estão em ordem crescente de propriedades mecânicas, bem como em ordem crescente de custo.

A Tabela 5 mostra algumas fibras utilizadas pela Equipe BAR Honda de Formula 1 em 2006. Como podemos ver, a equipe utiliza as fibras de baixo custo T300 e AS4 apenas em aplicações não estruturais (por exemplo, tomadas de ar laterais, ou carenagem do conjunto traseiro). A Figura 6 mostra a relação entre resistência e módulo de elasticidade de algumas fibras. As propriedades mecânicas ficam melhores no canto superior direito do gráfico.

Tabela 5 – Fibras utilizadas pela equipe BAR-Honda de Formula 1 em 2006. (Savage, 2006)

Especificação	Tipo	Marca	Observação
M46J	Alto Módulo	Toray	-
T800	Módulo intermediário	Toray	Preferido
T1000		Toray	-
IM7		Hexcel	Preferido
IM9		Hexcel	-
T300	Alta resistência	Toray	Não estrutural
AS4		Hexcel	

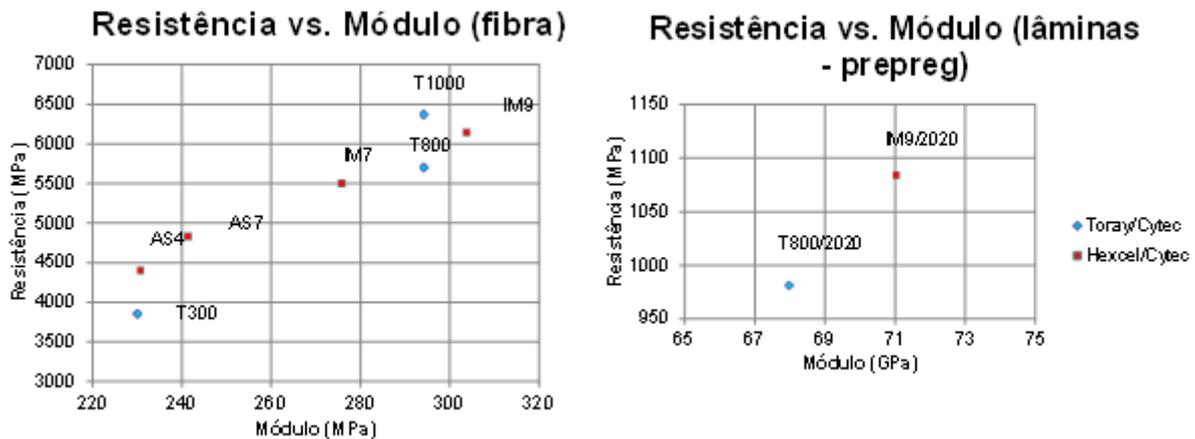


Figura 6 – Comparação de resistência e rigidez entre fibras e lâminas de prepreg das marcas Toray e Hexcel.

A lâmina é o conjunto fibra-interface-resina formando uma lâmina do compósito. Quando sobrepostas, formam o laminado. As propriedades da lâmina dependem tanto das propriedades da fibra quanto da resina, além de depender da ligação entre as duas partes, conhecida como interface. Desta forma, o processo de fabricação empregado influencia nas propriedades finais da lâmina. Foram analisadas lâminas de prepreg, por ser um processo de maior controle, com alta repetibilidade. As lâminas podem ter algumas configurações diferentes dependendo de como as fibras estão dispostas. As fibras podem ser entrelaçadas e formar um tecido bidirecional (ou multidirecional) manuseável, e este entrelace pode ser realizado de algumas formas diferentes, o que influencia nas propriedades mecânicas finais do compósito e na manuseabilidade durante a laminação. Além disso, as fibras podem ser dispostas unidirecionalmente.

De modo geral, tanto nas Formulas profissionais como na Formula SAE existe predominância de tecido bidirecionais. Isso se deve ao fato de que o material se torna de manuseio simples e a qualidade da construção em geral é de alta qualidade. O tecido bidirecional possui uma perda de propriedades mecânicas devido à ondulação imposta aos filamentos, conhecido como crimping. Além disso, esses tecidos também costumam levar à um desbalanceamento de propriedades, de modo que em laminados com poucas lâminas existe acoplamento extenso-flexional, o que dificulta o projeto e pode levar a comportamentos indesejados. Esse desbalanceamento degenera-se com o aumento do número de camadas. A Figura 6 mostra a relação entre resistência e módulo de elasticidade de algumas lâminas. As propriedades mecânicas ficam melhores no canto superior direito do gráfico.

#### 5. Materiais e métodos selecionados

Os materiais selecionados foram:

- Fabricação: prepreg autoclavado, utilizando bolsa de vácuo.
  - Prepreg: sistema prepreg M35-4, da HEXCEL.
    - o Fibra: CHS-24K (Alta Resistência), 24000 filamentos por feixe.
    - o Fração de massa (resina/fibra): 38%
    - o Gramatura: 150 g/m<sup>2</sup>
  - Núcleo: será selecionado no durante o dimensionamento do laminado básico.
- As propriedades físicas e mecânicas do prepreg selecionado podem ser encontradas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Propriedades físicas da lâmina curada M35-4, Hexcel. (Fonte: Folha de Especificações Hexcel)

Fibra	Carbono de alta resistência 24k	
Entrelace	Tela simples	
Gramatura	g/m <sup>2</sup>	150
Espessura de lâmina curada nominal	mm	0,154
Fração de volume de fibra nominal	%	53,4
Densidade de lâmina nominal	g/cm <sup>3</sup>	1,57

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do sistema M35-4. (Fonte: Folha de Especificações Hexcel).

Teste	Unidades	Método	Temperatura (°C)	Valor
Resistência à tração	MPa	EN2561	23	2000
Módulo à tração	GPa	EN2561	23	142
Resistência flexional	MPa	EN2562	23	1700
Módulo flexional	GPa	EN2562	23	117
Resistência ao cisalhamento interlaminar	MPa	EN2563	23	95
Resistência à compressão	MPa	EN2850B	23	1550
Módulo à compressão	GPa	EN2850B	23	-

## 6. Dimensionamento do laminado básico

As regras da Formula SAE de 2011 exigem que o monocoque atenda à algumas especificações estruturais mínimas, dadas com referência à um laminado básico padronizado, de dimensões 200 mm x 500 mm, representativo da estrutura de impacto lateral. Com respeito à sequência de laminação para o sanduíche, foi realizada uma pesquisa de literatura que levantou a seguinte opção (onde os ângulos indicados são medidos a partir do eixo longitudinal do veículo) como sendo a mais favorável:

- [(±45)<sub>n</sub>, Núcleo]<sub>s</sub>, como recomendado por Savage (2006). Essa configuração era a preferida na Formula 1 dada sua elevada rigidez torcional. De fato, a rigidez Q<sub>66</sub> de uma lamina é maximizada a um ângulo de 45° (ou -45°), levando à uma rigidez ao cisalhamento no plano máxima, o que finalmente leva à uma maior rigidez torcional, como explicada na Figura 7.

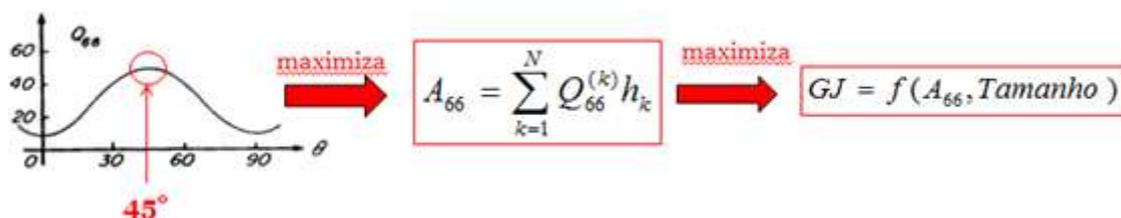


Figura 7 – Demonstração da maximização da rigidez torcional de uma lâmina segundo sua orientação (Vinson, 2002).

O núcleo é responsável por aumentar a rigidez do compósito enquanto mantém, de modo geral, outras propriedades do sistema inafetadas. Como tal, o núcleo de coméia deve ser bem colado às faces do laminado, assim como deve ser selecionado cuidadosamente de modo a evitar modos de falha típicos à esse tipo de construção. A Tabela 8 e a Figura 8 apresentam alguns modos de falha possíveis de uma construção sanduíche e métodos de se determinar condições aproximadas em que eles ocorrem.

Tabela 8 – Modos de falha de uma construção sanduíche (Vinson, 1999).

Modo de falha	Tipo	Causas	Verificação
1	Resistência	Resistência à tração, transferência de cisalhamento entre faces e núcleo.	Testes de tração e compressão das faces.
2	Rigidez (Deflexão)	Falta de rigidez no núcleo causa deflexão excessiva.	Cálculo de viga engastada.
3	Flambagem da placa	Instabilidade generalizada do sanduíche.	Crítério de flambagem de Euler.

Modo de falha	Tipo	Causas	Verificação
4	Ondulação por cisalhamento	Flambagem por compressão iniciada no núcleo.	Testes de compressão lateral do compósito
5	Ondulação da face	Rigidezas das faces e do núcleo estão em discordância de modo que a deflexão em um causa falha no outro	Razão de rigidezas da face e do núcleo deve ser proporcional.
6	Flambagem de célula	Tamanho da célula é grande o suficiente para causar delaminação da face devido à grandes deformações.	Garantir que células são pequenas o suficiente para manter a geometria.
7	Compressão local	Compressão do núcleo devido à carregamentos localizados excessivos.	Garantir que o núcleo é forte o suficiente para aplicações e reduzir carregamentos.



Figura 8 – modos de falha de uma construção sanduíche (Vinson, 1999).

Depois de realizar o dimensionamento, o núcleo de colméia escolhido foi o Hexcel® Hexweb CR111 – 1/4 – 5052 – .0015 – 3.4 com as propriedades mecânicas fornecidas pela fabricante.

O dimensionamento do laminado foi realizado considerando os modos de falha descritos acima, bem como regras aplicáveis da competição da Formula SAE de 2011. Em resumo, esta última requer que as equipes “devem demonstrar que o projeto do monocoque é equivalente a uma estrutura treliçada tubular de aço em termos de dissipação de energia, tensões de escoamento e de fratura em flexão, flambagem e tração.” Além disso, o regulamento da FSAE requer prova analítica que a Rigidez à Flexão (chamada de “Módulo de Flambagem” ou “EI” na literatura FSAE) de uma placa (representativa da estrutura de impacto lateral do monocoque) seja “pelo menos 50% da soma do EI dos três tubos base substituídos”.

Outro requisito importante é aquele estabelecido pela regra B3.28: “As equipes devem construir uma seção representativa da lateral do monocoque como uma placa e realizar um teste de flexão de três pontos nesta placa. Elas devem provar por teste físico que uma seção de 200 mm x 500 mm tem pelo menos as mesmas propriedades de uma barra de aço base de impacto lateral para rigidez à flexão e de dois tubos de impacto lateral para tensões de escoamento e de fratura.”

Para o propósito de uma análise analítica, os testes de flexão de três pontos e tração uniaxial mencionados foram replicados analiticamente de modo a dimensionar o laminado sanduíche. Neste sentido, os tubos de aço base foram primeiro analisados para determinar os valores alvo para resistência e rigidez, e então o sanduíche foi dimensionado de acordo com esses valores

No dimensionamento do laminado, há quatro variáveis de projeto independentes: 1) o número de laminas na face, 2) a espessura do núcleo de colméia, 3) o tamanho da célula da colméia, e 4) a espessura da folha da colméia. Note que, neste estágio, a espessura de cada lamina já é conhecida, já que é determinada na escolha do prepreg e informado nas folhas de dados da fabricante. No caso, o prepreg H24K/M35-4 da Hexcel possui uma espessura de lamina curada nominal de 0.154 mm.

A estratégia que foi seguida no dimensionamento do sanduíche está descrita na Figura 9. É importante lembrar que para o caso de carregamento no plano, a resistência do laminado é dominada pelas faces, já que o o núcleo de colméia praticamente não possui rigidez nesta direção. Assim, um bom ponto de início no dimensionamento do sanduíche seria determinar o número de laminas necessárias na face para sustentar os carregamento no plano sem falhar, como ilustrado no primeiro passo do fluxograma. Uma vez que o número de lâminas seja conhecido, uma análise de rigidez à flexão foi realizada para determinar a espessura necessária do núcleo de colméia (passo 2 no fluxograma).

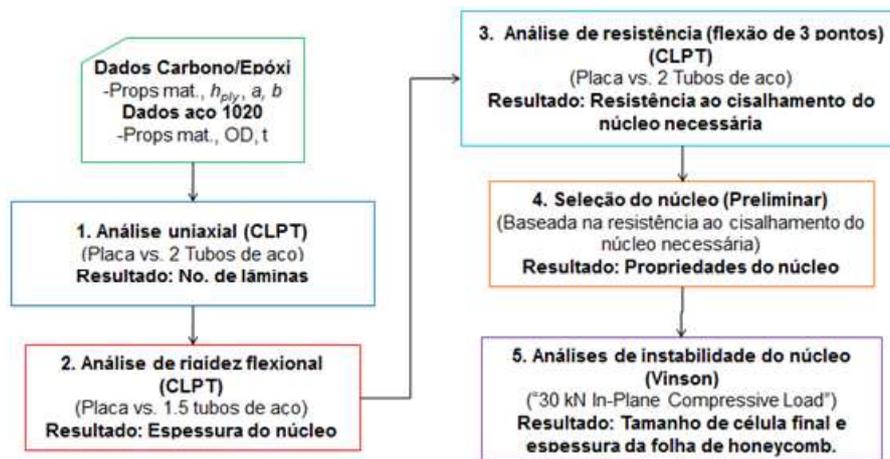


Figura 9 – Fluxograma de dimensionamento do laminado básico.

Note que, até este ponto, as propriedades mecânicas da colméia são desconhecidas, já que dependem do tamanho de célula e da espessura da folha, os quais ainda não foram selecionados. De fato, um dos principais resultados da análise de flexão de três pontos (passo 3 no fluxograma) é a tensão de cisalhamento transversal média que a colméia deve suportar sem falhar. O outro resultado é a margem de segurança das faces contra falha sob flexão de três pontos, o que não deve ser motivo para preocupação, dado que o sanduíche foi dimensionado adequadamente para resistência uniaxial e rigidez flexional. A resistência ao cisalhamento transversal da colméia depende da sua densidade, que por sua vez depende do tamanho da célula e da espessura da folha da colméia. Assim sendo, a tensão de cisalhamento transversal média que ocorre na colméia foi utilizada como base para seleção de uma combinação adequada de tamanho de célula e espessura de folha dentre as opções disponíveis comercialmente. De modo a reduzir a massa final, é obviamente recomendado que seja escolhida a colméia mais leve que ainda atenda às necessidades de resistência ao cisalhamento transversal. Este passo é nominado “Seleção do Núcleo (Preliminar)” no fluxograma.

Uma vez que o tamanho da célula e a espessura da folha tenham sido escolhidos, o último passo consiste na verificação da capacidade estrutural do sanduíche contra os quatro modos de falha por flambagem de estruturas sanduíche. Expressões analíticas e semi-empíricas para avaliar cada um desses modos estão bem documentadas na literatura. Uma carga de compressão no plano de 30 kN foi considerada para análises de flambagem, baseada na regra B3.36, que diz: “Em qualquer direção, cada ponto de fixação entre o monocoque e outra estrutura primária deve ser capaz de suportar uma carga de 30 kN. O laminado, placas de montagem, placas de suporte de carga e enxertos devem ter uma área de cisalhamento, uma área de soldagem e resistência suficientes para suportar a carga de 30 kN especificada em qualquer direção”. Se o sanduíche previamente dimensionado falhar em atender uma margem adequada contra qualquer um dos modos de flambagem, então iterações de projeto serão necessárias. Em tal situação, poderia ser melhor atacar este problema de flambagem modificando o tamanho da célula e a espessura da folha primeiro, sem modificar a espessura da colméia e o número de lâminas na face, se possível. Felizmente, isto não foi necessário no nosso caso já que as margens de segurança obtidas para todos os casos de flambagem foram bastante altas.

As dimensões propostas e sequência de laminação para o laminado sanduíche estão mostradas na Figura 10, como obtidos dos estudos de dimensionamento. Um resumo das margens de segurança é mostrado na Tabela 9.

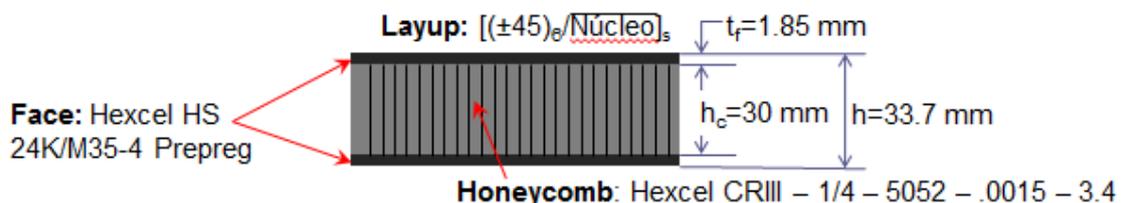


Figura 10 – Diagrama esquemático do laminado básico do monocoque.

Tabela 9 – Resumo das margens de segurança aos modos de falha analisados.

Modo de falha	Margem de segurança(%)
"EI" (Rigidez à flexão)	13%
Resistência uniaxial	29%
Resistência à flexão de 3 pontos (Cisalhamento do núcleo)	113%
Resistência à flexão de 3 pontos (FPF da face)	1957%
Enrugamento da face	2492%
Instabilidade generalizada	5888%
Instabilidade do núcleo	6795%
Instabilidade de célula	18026%

## 7. Geometria básica

A geometria básica do monocoque é apresentada a seguir na Figura 11.

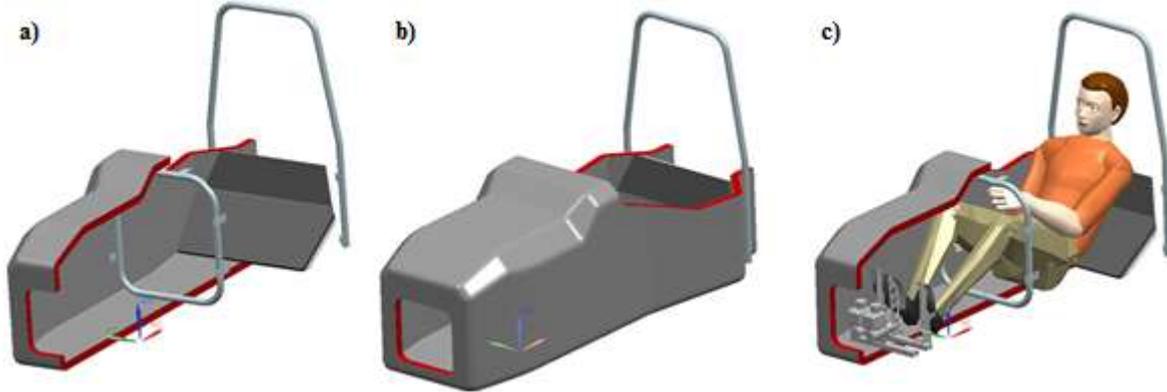


Figura 11 – Desenho básico em CAD do monocoque a) com corte longitudinal, b) sem corte e c) com corte, piloto e pedais de freio.

O desenho básico do monocoque foi projetado com todos os componentes já descritos nas seções anteriores. Detalhes do desenho não foram incluídos neste momento devido à impraticabilidade de se determinar com antecedência o conjunto exato de peças que serão utilizadas. Com o desenho básico definido, e utilizando as informações de densidade dos materiais escolhidos, podemos calcular a massa do monocoque, contando já os aros de capotamento (front hoop e main hoop). O volume do núcleo e o volume das faces, calculado por meio do software CAD são:

$$V_{\text{núcleo}} = 37762752.2 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{faces}} = 3848170.0 \text{ mm}^3$$

Mas de acordo com as Folhas de Especificação do núcleo e das faces escolhidas,

$$\rho_{\text{núcleo}} = 54.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{e} \quad \rho_{\text{face}} = 1570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Assim:

$$m_{\text{núcleo}} = \rho_{\text{núcleo}} V_{\text{núcleo}} = 2.1 \text{ kg}$$

$$m_{\text{faces}} = \rho_{\text{face}} V_{\text{faces}} = 6.0 \text{ kg}$$

Obtendo as massas dos aros de capotamento (incluindo as placas de fixação dos aros) por meio do software de CAD, obtemos:

$$m_{\text{arofrontal}} = 2.4 \text{ kg}$$

$$m_{\text{aroprincipal}} = 2.1 \text{ kg}$$

E a massa total do monocoque básico é:

$$m_{\text{monocoque}} = 12.6 \text{ kg}$$

Se estimarmos a massa das fixações (parafusos e enxertos) em 4 kg, temos finalmente:

$$m_{\text{monocoque estimada final}} = 16.6 \text{ kg}$$

Como o monocoque é uma peça híbrida, comparação com uma porção similar da estrutura tubular se faz adequada. Tal porção, quando obtida do modelo do veículo FP-02MA de 2010, corresponde à uma massa de 23 kg. Desse modo, o monocoque corresponde à uma redução de 27,8% em massa.

## 8. Conclusões

Como pode ser visto, o projeto de um monocoque exige interação entre vários aspectos do projeto do carro, desde uma visão de alto nível, com a relação entre o monocoque e os outros subsistemas harmonizando de modo a se obter uma configuração geométrica satisfatória, até uma visão mais detalhada, onde os aspectos construtivos e tecnológicos de materiais compósitos influenciam fortemente o projeto mecânico do monocoque.

Entretanto, foi obtido um projeto final que atende às normas da competição, permite uma configuração geométrica satisfatória para os componentes escolhidos e possui uma massa menor do que aquela obtida com projetos de aço treliçado tubular.

A rigidez do monocoque é normalmente muito superior à rigidez de um treliçado tubular. Portanto é razoável esperar que a rigidez do monocoque projetado também será muito maior do que a de um treliçado tubular.

Após a definição exata dos componentes que serão utilizados em competição, é necessário realizar o desenho detalhado do monocoque, com o posicionamento de todas as fixações e desenhos de fabricação de modo a obter um protótipo consistente.

O projeto encontra seu valor maior do ponto de vista que permite às futuras gerações da Equipe compreenderem os caminhos pelos quais devem obrigatoriamente trilhar no projeto completo de um monocoque, passando por aspectos

financeiros, tecnológicos, construtivos, teóricos, entre outros. Equipes futuras devem levar em consideração, entretanto, as mudanças que ocorrem às regras da competição de um ano para outro.

## 9. Referências

- GENTA, G., MORELLO, L. The automotive chassis, Volume 1: Components Design. Springer, 2009. 628 p.
- COSTIN, M., PHIPPS, D. Racing and sports car chassis design. 1a ed, Robert Bentley, 1961. 827 p.
- GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Danvers, MA, USA. Society of Automotive Engineering, 1992. 495p.
- ERICSSON, L. G. S. Estudo da Influência da Rigidez do Quadro na Dirigibilidade de um Veículo de Competição Formula SAE em Ambiente Multicorpos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica São Carlos) - Universidade de São Paulo, 2008.
- VINSON, R. J., SIERAKOWSKI, R. L. The Behavior of Structures Composed of Composite Materials. Springer, 2002. 456 p.
- VINSON, R. J. The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials. Technomic, 1999. 378 p.
- SAVAGE, G. Formula 1 composites Engineering. Elsevier, 2008
- SAVAGE, G. Enhancing the exploitation and efficiency of fibre-reinforced composites structures. Elsevier, 2005.
- SITE [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Datasheets/Honeycomb\\_Sandwich\\_Design\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Datasheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf) . Ultimo acesso 15/03/2011
- SITE [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M35\\_4\\_eu.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M35_4_eu.pdf) . Ultimo acesso 15/11/2011
- SITE [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M35\\_4\\_eu.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M35_4_eu.pdf) . Ultimo acesso 15/11/2011

## 10. Direitos autorais

### DESIGN OF A FORMULA SAE MONOCOQUE USING POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS

**Flávio Henrique Galetti Storto**

fhenriquegs@gmail.com

**Abstract.** The preliminary design of a carbon fiber reinforced polymer monocoque is performed using a sandwich type structure. The design was based on Formula SAE competition rules, and carried through analytical calculations. A stacking sequence is defined by these calculations, and a basic geometry is defined later on. The final design has an estimated mass of 16.6 kg, a reduction of 27,8% when compared to an equivalent tubular steel spaceframe. Even though a proper torsional stiffness analysis was not performed, preliminary Finite Element Analysis showed that the stiffness of a sandwich structure is an order of magnitude more stiff in torsion than its tubular steel spaceframe counterpart. Despite the increase in costs that come with usage of such a composite structure and the technological complications that arise, the project showed to be viable under performance and technical point of view.

**Keywords:** *Composite materials, Automotive Engineering, Competition Vehicles.*