



## Projeto conceitual e análise estrutural com utilização do método de elementos finitos em um chassi BAJA SAE

### Conceptual design and structural analysis using the finite element method on a BAJA SAE vehicle

Danielle Carlos Campos Carvalho Boynard<sup>1</sup>

Alessandro da Silva Rolin<sup>2</sup>

**Resumo:** O objetivo deste trabalho é definir uma estrutura para um veículo *off-road* destinado a competição Baja SAE (*Society of Automotive Engineers*), criado a partir do estudo do regulamento, obedecendo às normas estipuladas pelo mesmo, visando avaliar os resultados dos pontos críticos, fundamentados a partir de cenários usuais da competição. Os cenários foram criados baseados em obstáculos que geram flexão, torção, carregamento lateral e capotamento do veículo. Atualmente é comum o uso de softwares para desenvolver projetos. Eles possibilitam adequações ao projeto, prevendo o comportamento do material, simulando fatos reais aos quais o mesmo será submetido. Entre muitos destes softwares, foi escolhido para ser utilizado o Solidworks®. O SolidWorks® Simulation utiliza o “Finite Element Method” (FEM). A finalidade da aplicação do programa SolidWorks® Simulation no chassi do protótipo é calcular a resposta da estrutura às solicitações a que mais frequentemente estará sujeita. Para tal, será executada a sequência básica de etapas para aplicação do Método de Elementos Finitos apresentada em etapas de pré-processamento (Problema estrutural, planejamento do modelo de elementos finitos elaboração da malha de elementos finitos, condições de contorno, restrições e carregamento); Processamento (Solução) e pós-processamento (Verificação dos resultados).

**Palavras-chave:** Análise estrutural; Elementos finitos; Baja SAE.

<sup>1</sup>Institutos Superiores de Ensino do CENSA

<sup>2</sup>Institutos Superiores de Ensino do CENSA

**Abstract:** The objective of this project is to define a structure for an off-road vehicle destined to Baja SAE competition (Society of Automotive Engineers), created from the study of the regulation, obeying the norms stipulated by the same one, in order to evaluate the results of the critical points, from the usual scenarios of the competition. The scenarios were created based on obstacles that lead to bending, twisting, lateral loading and overturning of the vehicle. Currently, it is common to use software to develop projects. They make it possible to adapt to the project, predicting the behavior of the material, simulating real facts to which it will be submitted. Among many of these software, Solidworks® was chosen to be used. SolidWorks® Simulation uses the "Finite Element Method" (FEM). The purpose of applying the SolidWorks® Simulation program to the prototype chassis is to calculate the structure response to the most frequently requested requests. For this, the basic sequence of steps for applying the Finite Element Method presented in pre-processing steps (Structural Problem, Finite Element Modeling, finite element mesh elaboration, boundary conditions, constraints and loading) will be performed; Processing (Solution) and post-processing (Checking the results).

**Keywords:** Structural analysis; Finite elements; Baja SAE.

---

## **1. Introdução**

Segundo Genta e Morello (2009), a estrutura do chassi é carregada por cargas internas e externas. As cargas externas são transferidas através das rodas e solo, descarregando na suspensão e em seus componentes elásticos, e através do campo aerodinâmico em torno do corpo do veículo. Enquanto as cargas internas são geradas pela massa do veículo e por cargas internas significativas como passageiro e motor.

Segundo Beltrão (2009), com o grande desenvolvimento que o Método de Elementos Finitos apresentou na década de 60 e com a generalização dos meios de cálculo automático, assiste-se à utilização cada vez mais frequente deste método e passou a ser prática comum a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento.

## **2. Problemática e hipótese**

Para participar da Competição Baja SAE BRASIL, cada equipe deve construir um veículo protótipo off-road, capaz de resistir às cargas impostas durante a competição. A utilização de métodos analíticos para a avaliação do comportamento mecânico da estrutura de um veículo se torna complexo, pois envolve inúmeras equações, porém o uso de softwares que utilizam o Método dos Elementos Finitos torna mais fácil simular os esforços sofridos durante a competição.

Desta forma, este trabalho visa apresentar um projeto conceitual submetido a cenários por meio do uso de um software baseado no modelo numérico do Método dos Elementos Finitos, que buscam representar as situações reais da competição.

## **3. Justificativa e motivação**

Conforme Souza (1990), as estruturas veiculares possuem características próprias de acordo com a concepção e utilidade do veículo a ser projetado e os parâmetros de projeto de um chassi devem estar relacionados através de uma solução de compromisso. O mesmo cita ainda que não existe a melhor maneira de se construir um chassi pois cada veículo apresenta um conjunto diferente de problemas durante sua concepção e uso.

Costa (2014) pontua um conjunto de características para um projeto eficiente de um chassi, descritas abaixo:

- Comportar-se como uma viga, suportando o seu próprio peso, o do piloto e dos componentes.

- Preservar as relações geométricas entre os vários pontos da suspensão. Deve ter elevada rigidez torsional e elevada rigidez à flexão vertical e lateral, de modo a resistir, com pouca deformação, aos esforços impostos pela suspensão, pela transmissão, pela travagem e pela aceleração.
- Possuir o mínimo peso possível.
- Fornecer segurança ao piloto em situações de acidente.
- Apresentar baixo custo de fabricação.

O SolidWorks® 2015 pode ser utilizado para simular a eficiência de um modelo, reduzindo os ciclos de desenvolvimento do produto. A utilização da análise permite reduzir os custos, simulando o teste do modelo no computador inicialmente, antes de executar os testes de campo; diminuir a quantidade de ciclos de desenvolvimento e melhorar os produtos testando vários conceitos e cenários antes da decisão final.

#### **4. Objetivo Específico**

Os objetivos específicos para a elaboração desse estudo foram:

- Apresentar um projeto conceitual do veículo Baja;
- Determinar os cenários que geram esforços semelhantes aos sofridos na competição;
- Simular o comportamento mecânico através do SolidWorks®, baseado no MEF, das cargas atuantes durante estes cenários;
- Analisar os pontos críticos gerados pelos cenários.

#### **5. Metodologia**

Conforme descrito pelas normas da SAE, para participar da Competição Baja SAE BRASIL, cada equipe deve projetar e construir um veículo protótipo, fora de estrada (off-road), monoposto, robusto, visando comercialização ao público entusiasta e não profissional. Atendendo os critérios do Regulamento Baja SAE, foi dimensionada a estrutura do veículo Baja dos Institutos Superiores de Ensino do CENSA.

O regulamento SAE especifica que o material utilizado para todos os membros principais da gaiola e qualquer parte em que o cinto de segurança esteja fixado deve, no mínimo, ser:

- tubo de aço circular com um diâmetro externo de 25,4 mm (1 polegada), parede com espessura de 3,05 mm (0,120 in) e um teor de carbono de pelo menos 0,18%;

- os membros de aço devem possuir resistência à flexão e rigidez de flexão maior ou igual aos tubos especificados acima, desde que a espessura da parede seja igual ou maior do que 1,57 mm (0,062 in).

A tabela 1 apresenta os resultados entre os dados do Regulamento e o material utilizado, 1018 e 1020, respectivamente:

**Tabela 1:** Dados do Material

Material	Aço SAE 1018		Aço SAE 1020	
Módulo de Elasticidade (E)	205	<i>GPa</i>	205	<i>GPa</i>
Tensão de Escoamento ( $S_y$ )	370	<i>MPa</i>	390	<i>MPa</i>
Diâmetro externo ( $D$ )	25,4	<i>mm</i>	31,75	<i>mm</i>
Diâmetro interno ( $d$ )	19,3	<i>mm</i>	28,15	<i>mm</i>
Raio Externo ( $c$ )	12,7	<i>mm</i>	15,875	<i>mm</i>

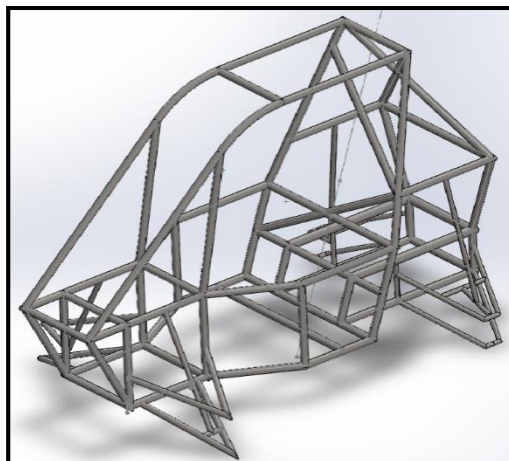
Foram encontrados os resultados exibidos na tabela 2, que se mostraram satisfatórios quanto às exigências.

**Tabela 2:** Comparativos Exigidos

Material	Aço SAE 1018		Aço SAE 1020	
Momento de Inércia	,90	$mm^4$	,50	$mm^4$
Rigidez à flexão	28	$Nm^2$	99	$Nm^2$
Momento plástico	3	$Nm$	1	$Nm$

Com isso o material utilizado fica sendo a tubulação de aço 1020 com diâmetro externo de 31,75 mm e interno de 28,15 mm.

O modelo estrutural criado para análise segue conforme a imagem 1, onde juntamente com todos os membros principais da gaiola, foram esboçados os modelos da suspensão.



**Imagem 1:** Modelo Estrutural

Para análise computacional, algumas etapas são comuns a todos os cenários. Estas etapas serão mencionadas abaixo:

- Definição do material: o material aplicado foi o aço 1020 com suas devidas características.
- Definição dos tipos de elementos: Para todos os cenários, as representações das molas dos amortecedores da suspensão foram definidas como treliças para que as mesmas transmitissem apenas forças axiais. Os componentes estruturais do chassi foram tratados como elementos de viga, uma vez que são resistentes a cargas axiais, flexão e torção. Para a definição correta dos nós que compõem a suspensão, as juntas foram definidas como rígidas nas suas junções e como manuais, articuladas nas 1ª e 2ª direções em sua ligação com a estrutura.

### 5.1 Descrição dos cenários

As demais etapas das análises computacionais são distintas em relação aos vários cenários. Desta forma serão tratadas particularmente dentro de cada tópico descrito abaixo.

#### ✓ Cenário de Flexão

O cenário de flexão é definido por ações provocadas por um obstáculo como ondulações no pavimento, onde ambas as rodas (traseiras ou dianteiras) encontram o obstáculo simultaneamente, gerando um momento fletor ( $M_y$ ) na estrutura do veículo.

A tabela 3 apresenta os pesos dos componentes considerados durante a simulação deste cenário. Quando o veículo retorna do obstáculo, ele é amortecido pela suspensão, porém o impacto resultante provoca um aumento considerável no carregamento. De acordo com Almacinha e Dinis (1986), os esforços verticais produzidos pela flexão são contabilizados multiplicando os pesos da parte suspensa do veículo e da carga pelo coeficiente dinâmico de 3,0 ( $C_d=3,0$ ).

**Tabela 3:** Descrição das cargas para Flexão

Descrição da carga	Valor	Valor x Cd
Força Gravitacional ( $m/s^2$ )	9,8	29,4
Peso do Motorista (kg)	113	339
Peso do Motor (kg)	35	105

Já a inclinação do veículo para as rodas traseiras no obstáculo, foi representado no modelo com a criação de um plano com angulação de  $30^\circ$ , em referência ao plano superior.

✓ Cenário de Torção

O cenário de torção foi idealizado a partir de cargas assimétricas, que ocorrem quando apenas uma, e/ou mais rodas são levantadas (saliência) ou abaixadas (reentrância). As cargas resultantes são verticais e longitudinais e aplicadas a uma extremidade do veículo e resulta em uma carga complexa na estrutura do chassi. A magnitude da força exercida sobre a roda e, conseqüentemente, através da suspensão para a estrutura dependerá da velocidade do veículo e das massas dos componentes.

Nesta situação cada roda apresenta diferentes momentos no mesmo eixo, sendo um momento torsor ( $M_x$ ) e um momento fletor ( $M_y$ ). A figura 57 serve como ilustração do caso de torção aplicado a uma competição Baja.

Pawlowski sugere que se utilize um coeficiente “m” elevando as cargas que representam o peso bruto e o binário de forças ( $M_x$ ), sendo adotado 1,8 como coeficiente ( $C_d=1,8$ ), com base na metodologia do mesmo. A tabela 4 apresenta o peso dos componentes considerados durante a simulação.

**Tabela 4:** Descrição das cargas para torção

Descrição da carga	Valor	Valor x Cd
Força Gravitacional ( $m/s^2$ )	9,8	17,64
Peso do Motorista (kg)	113	203,4
Peso do Motor (kg)	35	63

Da mesma forma como já efetuado na flexão, a inclinação do veículo de 30 graus, no obstáculo, foi representado no modelo com a criação de um plano com angulação de  $30^\circ$ , em referência ao plano superior.

✓ Cenário de Carregamento Lateral

As cargas laterais surgem quando curvas acentuadas são efetuadas pelo veículo. O cenário de carregamento lateral acontece quando as forças laterais são limitadas pela força de atrito que pode ser gerada na superfície de contato dos pneus com o solo durante uma curva em que, o valor da componente lateral ( $P_y$ ) da força centrífuga ( $P_c$ ) é limitada pela aderência do veículo ao solo.

A tabela 5 apresenta o peso dos componentes considerados durante a simulação. Um fator de segurança dinâmico é utilizado, devido a curta duração do pulso e inércia de rotação. Pawlowski (1969) sugere para evitar que a estrutura sofra deformação permanente, se os

esforços atuantes atingirem valores máximos, que o coeficiente de segurança deverá ter um valor de 1,4 a 1,6. Um valor de coeficiente de segurança de 1,5 foi adotado ( $C_s=1,5$ ).

**Tabela 5:** Descrição das cargas para carregamento lateral

Descrição da carga	Valor	Valor x $C_s$
Força Gravitacional ( $m/s^2$ )	9,8	14,7
Peso do Motorista (kg)	113	169,5
Peso do Motor (kg)	35	52,5

O plano utilizado para aplicação das forças foi o plano direito, que se encontra a  $90^\circ$  em referência ao plano superior.

✓ Cenário de Capotamento

O cenário de capotamento foi baseado em um protocolo utilizado pela indústria para aplicação em ROPS (RolloverProtectionStructures), destinados a equipamentos comerciais. A tabela 6 (matriz de validação) apresenta os parâmetros utilizados para as forças aplicadas durante este cenário:

**Tabela 6:** Matriz de Validação

Força de Carga Lateral	Força de Carga Vertical	Força de Carga Longitudinal
$1,5 \times g \times GVM$	$4,0 \times g \times GVM$	$1,0 \times g \times GVM$

Onde:

$g$ : constante gravitacional ( $m/s^2$ )

$GVM$ : massa bruta do veículo ( $Kg$ )

De acordo com a matriz de validação (tabela 6), as forças de carga lateral, vertical e longitudinal devem ser aplicadas na fórmula  $cd \times g \times GVM$ , onde  $g = 9,81m/s^2$  e  $GVM$ = massa bruta do veículo. Para a definição da massa bruta do veículo foi utilizada a tabela 7 com a descrição dos pesos dos componentes do veículo.

**Tabela 7:** Peso Bruto do Veículo

Descrição do componente	Peso (kg)
Motorista	113,4
Motor	35
Suspensão Dianteira Direita	13
Suspensão Dianteira Esquerda	13
Suspensão Traseira Direita	17
Suspensão Traseira Esquerda	17



Chassi	50
Massa total	258,4
Outros componentes (110% do valor total)	284,24

De acordo com a matriz de validação deste protocolo a carga lateral é definida pela fórmula  $1,5 \times g \times GVM$ , onde  $g = 9,8m/s^2$  e  $GVM =$  massa bruta do veículo (284,24 kg), totalizando uma força aplicada de 4178,33 N. A carga vertical é definida pela fórmula  $4,0 \times g \times GVM$ , onde  $g = 9,8m/s^2$  e  $GVM =$  massa bruta do veículo (284,24 kg), totalizando uma força aplicada de 11.142,21 N. A carga longitudinal é definida pela fórmula  $1,0 \times g \times GVM$ , onde  $g = 9,8m/s^2$  e  $GVM =$  massa bruta do veículo (284,24 kg), totalizando uma força aplicada de 2785,55 N.

## 6. Resultados e discussões

Os resultados apresentados foram obtidos a partir de uma análise linear elástica para todos os cenários descritos na metodologia. As plotagens a serem analisadas consideram a pior condição para a tensão, que são a combinação de tensões axiais (tração e compressão) com flexão nos dois eixos (x e y).

### 6.1 Resultados no cenário de flexão

Na tabela 8, estão apresentados um resumo dos resultados do cenário de flexão.

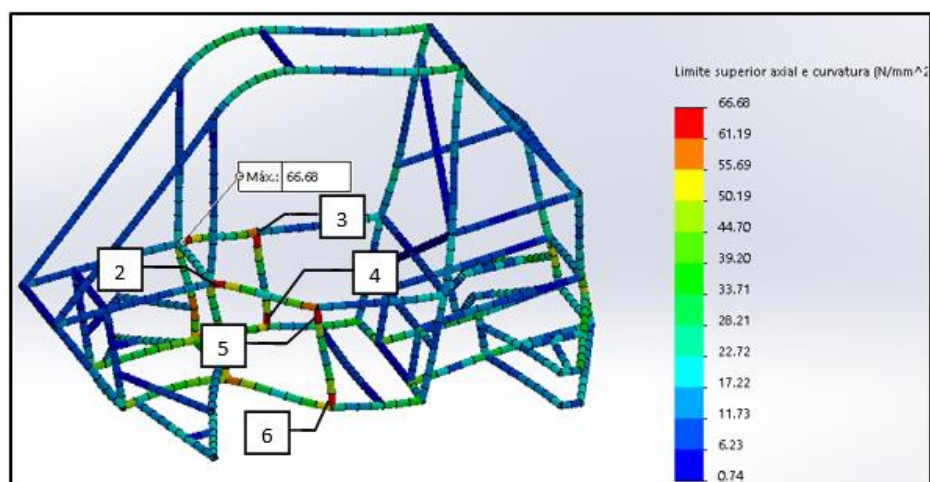
**Tabela 8:** Resumo de Resultados de Flexão

	Flexão devido a dianteira	Flexão devido a traseira
Tensão Combinada (MPa)	62,77	66,68
Tensão Axial (MPa)	-20,29	-18,80
Tensão de Flexão M1 (MPa)	44,91	62,95
Deslocamento (mm)	0,98	1,54

Tendo a tensão de escoamento (390 MPa) como sendo a tensão de falha, os resultados da tabela 8, se mostram aceitáveis, com um nível de segurança mínimo em torno de 5,8.

A imagem 2 mostra os resultados de tensões axiais e de curvatura (tensão combinada) para o cenário de flexão, considerando a passagem das rodas traseiras no obstáculo (ressalto), que se mostrou o mais crítico na tabela.

O valor máximo para tensões axiais e de curvatura está localizado próximo ao travamento vertical direito e um dos valores elevados, identificado pelo número 2 na imagem 2, se encontra próximo ao travamento esquerdo, com valores praticamente iguais a 66 Mpa.

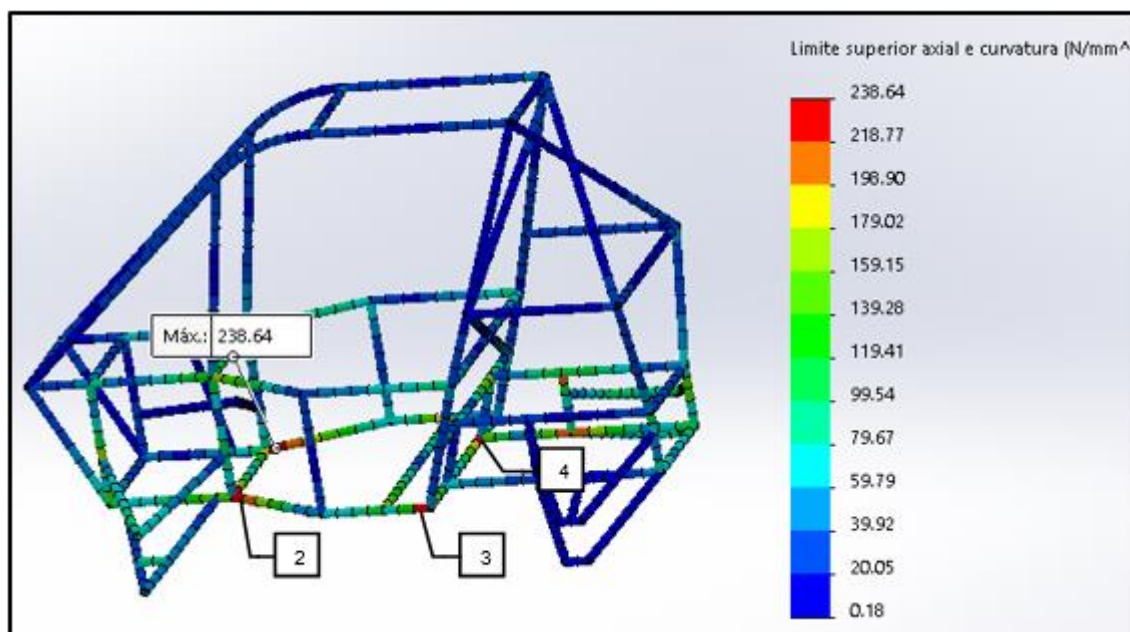


**Imagem 2:**Regiões com altas tensões axiais e de curvatura (rodas traseiras)

### 6.2 Resultados no cenário de torção

O valor máximo para tensões axiais e de curvatura está localizado nos pontos dos componentes estruturais próximos às juntas que receberam a força peso do motorista, identificadas pelos números 2, 3 e 4, com valores de 229,03; 215,68 e 210,0 MPa, conforme mostra a figura 3.

Na imagem3 é possível visualizar os locais onde as tensões axiais e de curvatura combinadas se mostram mais elevadas, com valor de 238,64 MPa.



**Imagem 3:** Tensões axiais e de curvatura elevadas para torção

Na tabela 9, estão apresentados um resumo dos resultados do cenário de torção.

**Tabela 9:** Resumo de Resultados de Torção

	Torção do chassi
Tensão Combinada (MPa)	238,64
Tensão Axial (MPa)	43,49
Tensão de Flexão M1 (MPa)	-181,61
Deslocamento (mm)	21,40

Tendo a tensão de escoamento (390 MPa) como sendo a tensão de falha, os resultados da tabela 8, se mostram aceitáveis, com um nível de segurança mínimo em torno de 1,6.

### 6.3 Resultados no cenário de carregamento lateral

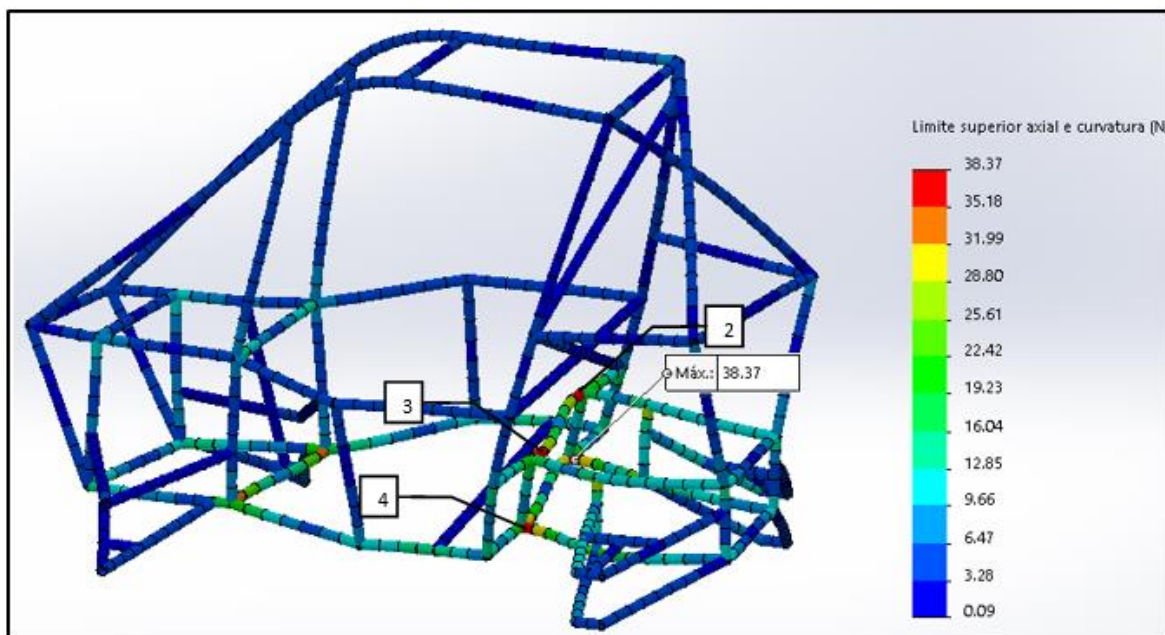
As plotagens a serem analisadas consideram a pior condição para a tensão, que é a combinação de tensão axial com flexão. A imagem4 apresenta a plotagem das tensões axial e de curvatura combinadas, com seu valor máximo de 38,37 MPa.

Na tabela 10, estão apresentados um resumo dos resultados do cenário de carregamento lateral.

**Tabela 10:** Resumo de Resultados de Carregamento Lateral

	Carregamento Lateral
Tensão Combinada (MPa)	38,37
Tensão Axial (MPa)	6,54
Tensão de Flexão M1 (MPa)	-23,11
Deslocamento (mm)	0,50

A imagem 4 mostra as regiões onde foram encontrados os valores mais elevados para tensões axiais e de curvatura.



**Imagem 4:** Valores elevados de tensões axiais e de curvatura para carregamento lateral

#### 6.4 Resultados no cenário de capotamento

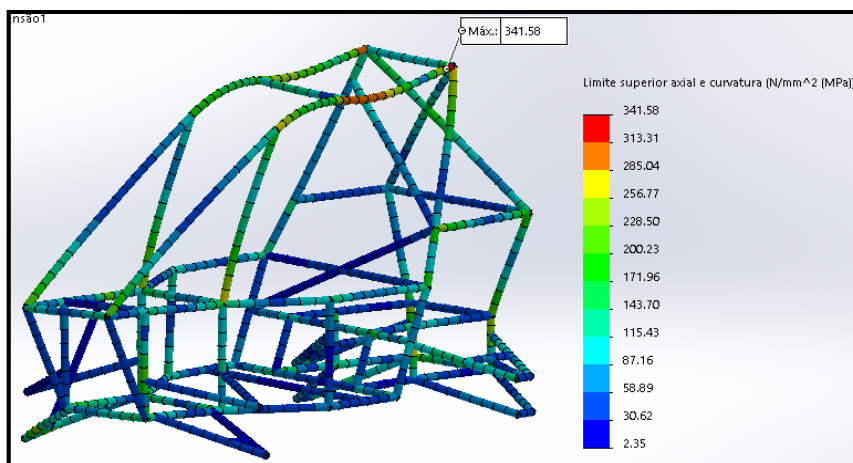
Os valores mais elevados foram encontrados nos componentes próximos às juntas onde foi fixado o motor, numerados por 2, 3 e 4 na figura 4, com valores em torno de 38 Mpa.

Na tabela 11, estão apresentados um resumo dos resultados do cenário de capotamento.

**Tabela 11:** Resumo de Resultados de Capotamento

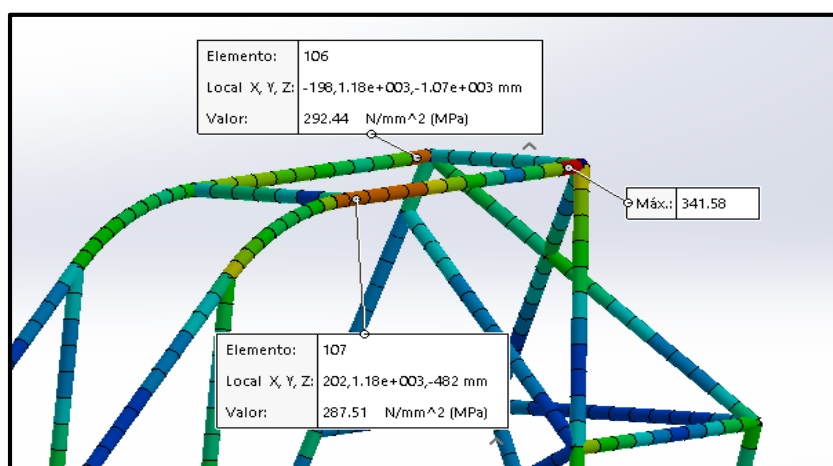
	Capotamento
Tensão Combinada (MPa)	341,58
Tensão Axial (MPa)	-78,81
Tensão de Flexão M1 (MPa)	-255
Deslocamento (mm)	21,21

As plotagens a serem analisadas consideram a pior condição para a tensão, que é a combinação de tensão axial com flexão. A imagem 5 mostra o local onde as tensões axiais e de curvatura combinadas mostram seu valor máximo para o cenário de capotamento.



**Imagem 5:** Tensões axiais e de curvatura para capotamento

Os valores mais elevados para tensões axiais e de curvatura no cenário de capotamento foram encontrados na estrutura superior do veículo conforme mostra a imagem 6.



**Imagem 6:** Valores elevados para tensão combinada no cenário de capotamento

Tendo a tensão de escoamento (390 MPa) como sendo a tensão de falha, os resultados da tabela 17, se mostram aceitáveis, com um nível de segurança mínimo em torno de 1,14.

## 7. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo do comportamento mecânico da estrutura do veículo Baja dos Institutos Superiores de Ensino do Censa mediante a cenários desenvolvidos computacionalmente semelhantes aos da Competição Baja SAE.

As cargas utilizadas nos cenários foram: motor, motorista e peso próprio do veículo. Todas majoradas de um coeficiente dinâmico, com base na literatura. Os cenários criados buscaram analisar a solicitação máxima da estrutura.

Por meio das simulações geradas, foi possível observar que as deformações sofridas na estrutura do veículo foram baixas, conforme demonstram as tabelas ao final de cada cenário. O deslocamento máximo da estrutura foi encontrado no cenário de torção, no valor de 21,40 mm. E o valor máximo para as tensões combinadas foi o valor de 341,58 MPa, encontrado no cenário de capotamento, diante de uma tensão de escoamento de 390 MPa.

Diante dos cenários analisados e resultados obtidos, o comportamento mecânico da estrutura está adequado aos esforços solicitados pela competição.

## 8. Referências

- ALMACINHA, J. A. S.; DINIS, L. M. J. S. 1986. *Acções a Considerar no Projecto de Veículos Automóveis: O cálculo estático no dimensionamento da estrutura*. Tecnometal.
- BELTRÃO, V. J. A. 2009. *Desenvolvimento de Conceito e Análise Estrutural de um Kart que Acompanha o Crescimento da Criança*. 2009. Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa.
- COSTA, B. A. C. 2014. *Conceção e dimensionamento do chassis e sistema de travagem de um veículo de competição do tipo Fórmula SAE*. 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa.
- GENTA G.; MORELLO L. 2009. *The Automotive Chassis: Components Design. Mechanical Engineering Series*, Springer Science Business Media B.V.
- SOUZA, TEN. CEL. M. A. 1990. *Chassis: Estudo dos Pneus e Rodas*. Instituto Militar de Engenharia.