

ANÁLISE ESTRUTURAL DE CHASSI DE VEÍCULO BAJA SAE UTILIZANDO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

R. H. OLIVEIRA FILHO^{1*}, P. P. R. NISHIDA¹, T. A. GUIMARÃES², G. H. T. SOUSA¹

Universidade Federal de Uberlândia (UFU) ¹

Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) ²

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-9410>*

ricardo.humberto@ufu.br*

Submetido 23/07/2025 - Aceito 18/11/2025

DOI: 10.15628/holos.2025.18855

RESUMO

O programa Baja SAE é uma competição internacional de engenharia em que alunos de graduação, organizados em equipes, projetam e constroem um protótipo *off-road* para competir entre si. Nesse âmbito, os principais parâmetros avaliados pelo programa são a segurança e o desempenho do veículo. Uma das áreas principais para garantia de performance nesses parâmetros é o desenvolvimento do chassi, que é o principal sistema de proteção ao piloto, além de ser responsável pelo suporte aos outros componentes do veículo. Nesse contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo a

validação do novo chassi da Equipe Cerrado Baja por meio da avaliação das tensões e deslocamentos em situações de impactos laterais, frontais e de capotamento utilizando o método dos elementos finitos (MEF). A partir dos resultados obtidos pelas análises foi possível concluir que, em caso de acontecimento real das análises realizadas, o chassi atende aos requisitos técnicos especificados pela literatura, com deslocamentos menores que a distância mínima ao piloto, garantindo a validação estrutural do chassi.

PALAVRAS-CHAVE: análise estrutural, elementos finitos, Baja SAE.

STRUCTURAL ANALYSIS OF BAJA SAE VEHICLE CHASSIS USING FINITE ELEMENTS METHOD

ABSTRACT

The Baja SAE program constitutes an international engineering competition in which undergraduate students, organized into teams, design and construct off-road prototypes to compete against one another. Within this framework, the principal parameters evaluated by the program are vehicle safety and performance. One of the primary areas for ensuring performance in these parameters is chassis development, which serves as the principal pilot protection system, in addition to being responsible for supporting the other vehicle components. In this context, the present study had as its primary

objective the validation of the new chassis of the Cerrado Baja Team through the evaluation of stresses and displacements in situations involving lateral, frontal, and rollover impacts utilizing the finite element method (FEM). Based on the results obtained from the analyses, it was possible to conclude that, in the event of real occurrence of the scenarios analyzed, the chassis would satisfy the technical requirements specified in the literature, with displacements smaller than the minimum distance to the pilot, thereby ensuring the structural validation of the chassis.

KEYWORDS: structural analysis, finite elements, Baja SAE.

1 INTRODUÇÃO

O programa Baja, viabilizado pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), tem o objetivo de fomentar a aplicação dos conhecimentos adquiridos no meio acadêmico por alunos de engenharia mediante a realização de eventos de competição. Na competição o protótipo de veículo *off-road* é avaliado quanto a segurança, o projeto, a aceleração, a velocidade e a resistência através de diversas provas (SAE, Programas estudantis, 2024).

Dentre as provas realizadas, ocorre o “enduro de resistência” como principal evento. Nele, os veículos devem completar voltas em uma pista de terreno acidentado, *off-road*, com obstáculos, por até 4 horas (SAE, Programas estudantis, 2024). Por se tratar de uma prova de longa duração, com um número elevado de veículos simultâneos na pista, a ocorrência de acidentes é comum. Assim, a garantia de segurança do piloto é um aspecto fundamental na concepção do projeto.

A maneira e regularidade dos acidentes variam de acordo com as condições de pista no momento da prova, entretanto, é notório que a grande maioria dos acidentes ocorrem em saídas curvas e nos obstáculos do tipo rampa, gerando acidentes do tipo capotamento, impacto frontal e impacto lateral.

O chassi é a estrutura utilizada em um veículo automotor para sustentar todos os componentes presentes, além de ser responsável por acomodar e proteger o piloto, dessa maneira faz-se necessário que ele apresente adequada capacidade de suportar esforços e tenha rigidez compatível (Seward, 2014). O chassi é considerado o principal sistema de proteção ao piloto quando ocorrem situações de impacto e capotamento (Lottermann, 2014).

Dentro do contexto de validação e análise de chassi de veículos para competições utilizando o método dos elementos finitos, alguns trabalhos podem ser destacados. Lottermann (2014), buscou propor uma formulação matemática para o caso de tombamento e capotamento de um chassi do tipo Baja SAE. Para isso, ele utilizou de normas internacionais para o teste de ROPS (*Roll Over Protection Structure*) para realizar validação numérica e experimental do chassi nos casos descritos. A validação numérica foi feita a partir de um modelo MEF baseado em elementos de casca e a aplicação de cargas pontuais no chassi de acordo com as determinações do protocolo Australiano. As mesmas cargas foram aplicadas na bancada de teste com a estrutura real, utilizando-se de pistões hidráulicos. Os resultados entre os testes experimentais e computacionais apresentaram discrepâncias significantes em relação aos deslocamentos, entretanto, o autor argumenta que essa diferença era esperada, baseado no fato do modelo computacional não considerar imperfeições, homogeneidade e microfissuras no material. Apesar das discrepâncias, o autor concluiu que o chassi era seguro, uma vez que não houve rompimentos nos membros do chassi durante o teste experimental.

Em seu trabalho, Cézar (2017) teve como objetivo a proposição de um modelo numérico com intuito de simular situações estáticas e dinâmicas num chassi do tipo mini-baja, para isso realizou simulações numéricas e testes experimentais correspondentes a fim de validar o modelo. O autor, utilizou do método dos elementos finitos com elementos do tipo viga para adquirir as 5 primeiras frequências naturais do chassi em diversas condições de contorno, além de fazer testes

com cargas estáticas para obter os níveis de tensões. Para validar o seu modelo, utilizou-se de acelerômetros e extensômetros para instrumentar o carro e colher resultados experimentais. Ao final de seu trabalho, o autor concluiu que o modelo proposto é válido após apresentar boa coerência com os resultados experimentais, tanto nas análises dinâmicas quanto nas análises estáticas.

Andrade (2022), pretendeu validar o chassi da equipe SamaBaja, quanto a uma situação de impacto frontal e quanto à rigidez torcional fornecida por ele. O autor usou o método dos elementos finitos, com elementos de viga para discretização. Na simulação de impacto frontal também foi utilizada a aplicação de cargas estáticas para representar a colisão, entretanto essas foram calculadas por meio do teorema do impulso e quantidade de movimento, partindo das informações de massa, velocidade e tempo de impacto. A partir do resultado das simulações, o autor concluiu que o chassi da equipe SamaBaja necessitava de melhorias, e assim ele o fez. Após a otimização do chassi, o autor realizou novamente as simulações e concluiu que o chassi alcançou rigidez torcional suficiente e se mostrou seguro nas situações de impacto frontal.

Seguindo essa linha de raciocínio, este estudo pretende realizar a validação estrutural geral do chassi da equipe Cerrado Baja, através de análises estáticas que simulam situações críticas de colisões contra o chassi. As análises serão realizadas utilizando o método dos elementos finitos, com elementos de viga para a discretização, aplicando o solver do software ANSYS®. Os cenários de colisões simulados serão os de impacto frontal, impacto lateral e capotamento e, assim como no trabalho escrito por Andrade (2022), eles serão representados pela aplicação de cargas estáticas, calculadas pelo do teorema do impulso e quantidade de movimento, utilizando as informações de massa, velocidade e tempo de impacto, sendo o último um dos principais temas de discussão neste trabalho. Com os resultados aquisitados pelas simulações, espera-se tirar conclusões pertinentes sobre a segurança do chassi, a necessidade de modificações na geometria da estrutura e sobre a segurança do piloto num modo geral.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, para a realização das análises citadas anteriormente é necessária a definição da forma geométrica do chassi por meio de um programa CAD (*Computer Aided Design*). Para isso, o modelo 3D do chassi foi elaborado utilizando o *software* SolidWorks®, seguindo os requisitos mínimos propostos pelo RATBSB (Regulamento Administrativo e Técnico Baja Sae Brasil) Emenda 6. O modelo 3D do chassi pode ser observado na Figura 1.

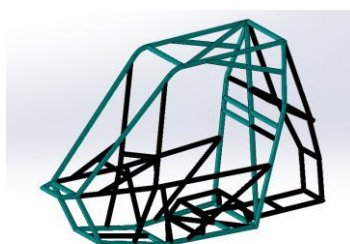


Figura 1. Modelo 3D do chassi

O modelo foi projetado com dois perfis de tubo diferentes de mesmo material, o aço SAE 4130. Na Figura 1, os tubos primários são representados pelos tubos de cor ciano, e os tubos secundários são os tubos de cor preta.

Com o modelo 3D confeccionado, foram definidos estágios lógicos para efetuar as análises necessárias para a validação do chassi, sendo eles: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa de pré-processamento, serão definidas no *software* as propriedades referentes ao material do chassi, será realizado o processo de geração de malha na geometria e a definição das condições de contorno que nortearão as simulações. O processamento se refere ao estágio de utilização do *solver* do ANSYS® para a solução do modelo. Finalmente, o pós-processamento se refere a avaliação dos resultados obtidos a fim de garantir a correspondência entre análises numéricas com os resultados esperados da situação real.

2.1. Pré-processamento

Dessa forma, como etapa inicial do pré-processamento, as propriedades referentes ao aço SAE 4130, o qual foi utilizado para a construção do chassi do carro, foram definidas no *software*, de acordo com as informações fornecidas pela Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do aço SAE 4130

Aço SAE 4130		
Propriedade Mecânica	Magnitude	Unidade
Limite de Escoamento	460,00	MPa
Resistência à Tração	560,00	MPa
Densidade	7850,00	Kg/m ³
Módulo de Elasticidade	205,00	GPa
Coeficiente de Poisson	0,30	nda
Alongamento Percentual	21,00	%

Fonte: ASM (1983).

Em seguida, é necessária a preparação da geometria para a realização das análises propostas. Nessa etapa, a modelagem 3D realizada no SolidWorks®, é importada ao ANSYS® e deve passar por um processo de reparos e manipulação na geometria dentro do módulo *SpaceClaim* presente no *software*.

Neste módulo, foram extraídos elementos de viga a partir da geometria inicial. Numa simulação estrutural realizada a partir de um modelo 3D completo, o custo computacional necessário é bastante alto. Em virtude disso é utilizado o elemento de viga, que fornece resultados que se aproximam bem das condições reais de carga, além de demandar menor capacidade de processamento computacional em relação aos elementos tridimensionais (Alves, 2012).

Os elementos do tipo viga, ilustrados pela Figura 2 podem ser entendidos como uma linha com propriedades de secção transversal associadas. Trata-se de um elemento unidimensional sem dimensões físicas nas direções normais ao comprimento, e são a escolha natural para estruturas compostas por elementos soldados em que o comprimento é significativamente maior quando comparado às outras dimensões (Kurowski, 2015). Eles possuem a capacidade de retratar

situações em que ocorrem esforços de tração, compressão, flexão e torção. Baseado na formulação de viga de Timoshenko, ele inclui também os efeitos de deformação pela ação do cisalhamento. Além disso, o elemento possui seis graus de liberdade em cada nó: rotações em torno dos eixos x, y, z e translações na direção dos eixos x, y, z . (ANSYS®, 2025).

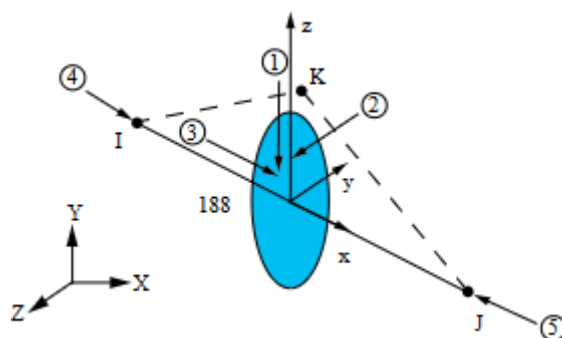


Figura 2. Ilustração de um elemento de viga
 Fonte: ANSYS® (2025).

Assim, foram definidas as propriedades geométricas dos tubos apresentados na Tabela 2, a cada um dos elementos de viga equivalentes na própria área de trabalho do módulo SpaceClaim.

Tabela 1. Parâmetros Geométricos dos tubos.

Tipo de tubo	Diâmetro Externo [mm]	Diâmetro Interno [mm]	Momento de Inércia de Área [mm ⁴]	Momento Polar de Inércia [mm ⁴]
Primário	31,75	28,55	17268,84	34537,68
Secundário	25,40	23,60	5204,59	10409,17

O processo de geração de malha foi iniciado com a extração dos elementos de viga, etapa que consiste na conversão da geometria 3D modelada em elementos estruturais equivalentes. Nessa fase, cada componente do chassi é transformado em uma viga com proporções idênticas às do modelo original, garantindo que todas as ligações entre os elementos sejam preservadas. No entanto, para que o *software* finalize a implementação da malha, é necessário definir o tamanho de cada elemento que representará as vigas extraídas. Essa etapa é essencial para garantir a aproximação dos resultados teóricos com a comportamento real da estrutura, o que levou à realização do processo de análise de convergência de malha. Para isso, foram realizadas sucessivas comparações entre a tensão equivalente de von Mises e o número de elementos presentes na malha, até que a magnitude das tensões convergisse, como apresentado na Figura 3.

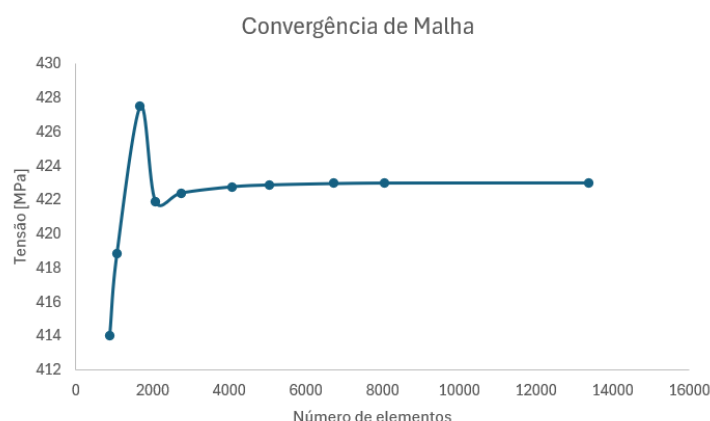


Figura 3. Análise de convergência de malha.

A análise da Figura 3 revela que, a partir de aproximadamente 4000 elementos, a tensão equivalente de von Mises converge para 423 MPa, de maneira que o refino adicional no tamanho de elemento não causaria melhorias no erro apresentado pelo modelo. Desta forma, foi definida a geração de malha com aproximadamente 4300 elementos para as análises estáticas realizadas.

A última etapa do pré-processamento é a definição das condições de contorno, restrições e carregamentos que irão conduzir a simulação de cada um dos cenários de análise estática propostos.

No contexto dos impactos frontal e lateral, a definição da magnitude dos carregamentos a serem aplicadas ao modelo foi efetuada a partir da estimativa do tempo de duração dos impactos, da velocidade do veículo no momento da batida e da massa do protótipo, de acordo com o teorema do impulso e quantidade de movimento, exemplificado pela Equação (1).

$$F = \frac{m \cdot v}{\Delta t} \quad (1)$$

onde:

- F – Força do impacto em N;
- m – Massa do veículo em kg;
- v – Velocidade do veículo em m/s;
- Δt – Tempo de duração do impacto em s.

A magnitude de força aplicada no modelo para a simulação da situação de capotamento será definida por meio do modelo proposto por Shah (2021), em que a força atuante numa situação de capotamento superior corresponde a 25% da força calculada pelo impacto frontal.

O protótipo atual da equipe Cerrado Baja tem como velocidade máxima atingida o valor de 45 km/h. Entretanto, durante as provas da competição baja, os veículos se mantêm numa velocidade média próxima aos 30 km/h (Andrade, 2022). Os programas que oferecem certificação quanto a segurança veicular adotam valores distintos de velocidade em seus testes. A Latin NCAP adotou, em seus testes de colisão frontal, um impacto a 64 km/h contra uma barreira deformável descentrada, a fim de simular a colisão entre dois veículos a 56 km/h (Latin NCAP, 2021). Já o

protocolo de teste sugerido pela Euro NCAP para certificação de carros europeus propõe a velocidade de impacto como 50 km/h com a tolerância de 1km/h para mais ou para menos (Euro NCAP, 2024).

Para o cenário de teste de impacto lateral, a Latin NCAP se utiliza de uma barreira deformável montada num carrinho, que atinge uma velocidade de 50 km/h antes de impactar contra o veículo de teste num ângulo reto (Latin NCAP, 2025).

Dessa forma, buscando um equilíbrio entre a velocidade de impacto utilizada em testes de veículos tradicionais e a velocidade atingida pelos protótipos do tipo Baja SAE, foi adotada a velocidade de 40 km/h para estimar a força gerada pelos impactos.

A massa estimada do protótipo da Equipe Cerrado Baja é de aproximadamente 250 kg, incluindo o piloto. Assim, esta será a massa utilizada para a realização dos cálculos de magnitude de força.

Assim, o último parâmetro a ser definido para o cálculo da magnitude das forças utilizado nas simulações de impacto lateral e frontal é a duração destes impactos. Nesse sentido, Agaram et al. (2000), ao analisar os dados de *Crash-Pulse*, a curva de aceleração registrada em um veículo durante um teste de colisão, disponíveis no banco de dados da NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*) para testes de impacto frontal a 48 km/h, concluíram que a duração média do pulso é de 116 ms.

Durante a certificação do veículo T-Cross, fabricado pela Volkswagen do Brasil, pela empresa Latin NCAP, a duração dos impactos lateral e frontal contra barreiras deformáveis foi medida pela empresa fabricante do carro. Neste teste, a duração do impacto frontal medido pela fabricante foi de 115 ms e a do impacto lateral foi de 60 ms. (Online, 2019.)

Wilson e Haight (2012) executaram nove testes de impacto lateral entre dois carros com o intuito de analisar a dinâmica de impacto veicular e comparar os seus resultados com aqueles obtidos em testes de barreira deformável móvel realizados pela NHTSA. Nesse estudo, foi constatado que a duração dos *crash-pulses* entre veículos foi em média mais que duas vezes maior que aqueles apresentados nos testes realizados pela NHTSA.

Levando em consideração que as simulações a serem realizadas buscam representar situações de impacto entre dois veículos, a constatação feita por Wilson e Haight (2012) será aplicada, buscando corrigir os valores de duração de impacto decorrentes de testes de barreira deformável presentes na literatura. Desta forma, tomando os valores de duração medidos nos testes realizados no Volkswagen T-Cross e aplicando a correção de duas vezes e meia para a situação de impacto lateral, o tempo de duração em cada caso de impacto é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Tempo de duração impacto.

Tipo de Impacto	Δt [ms]
Frontal	115
Lateral	150

Dessa forma, os parâmetros de força utilizados nas simulações, calculados pela Equação (1) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Magnitude das forças aplicadas ao modelo.

Situação de Impacto	Magnitude da força [N]
Impacto Frontal	24154,6
Impacto Lateral	18518,5
Capotamento	6038,5

Com os parâmetros de força definidos, a próxima etapa é a definição das condições de contorno para as simulações, na forma da enumeração das restrições nodais e os elementos em que as forças serão aplicadas no modelo. De acordo com Barroso et al. (2015), o êxito na resolução de um cálculo aplicado a uma estrutura mecânica não depende apenas do conhecimento matemático envolvido, mas também da habilidade de quem o realiza em compreender os aspectos físicos do problema, já que identificando os elementos mais importantes da situação em análise, é possível formular hipóteses sobre o comportamento da estrutura, o que contribui para um desenvolvimento mais eficiente e preciso do projeto. Partindo desse pressuposto, as condições de contorno foram atribuídas da seguinte maneira. No contexto de impacto frontal, foi considerado o chassi sofrendo impacto no tubo frontal, e com os pontos de fixação da suspensão traseira restringidos quanto a deslocamentos nas 3 direções – Figura 4 (a). Na condição de impacto lateral, os pontos de fixação da suspensão de um lado do chassi tiveram os graus de liberdade de translação restritos, sendo a carga aplicada nos tubos do lado oposto da estrutura – Figura 4 (b). Na condição de capotamento, o carregamento foi aplicado nos tubos que compõem o teto do chassi, e os suportes fixos considerados foram os nós exteriores dos tubos que definem o plano do assoalho do veículo – Figura 4 (c). Na Figura 4, os pontos destacados em preto e branco representam as restrições nodais aplicadas e os membros em vermelho representam o local de aplicação da força na estrutura.

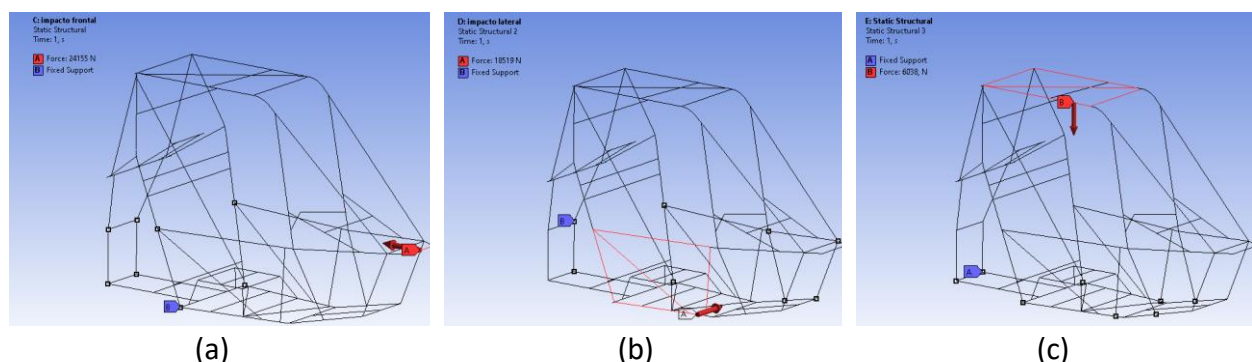


Figura 4. Condições de contorno para as análises realizadas - a) condições para impacto frontal; b) condições para impacto lateral e c) condições para capotamento.

2.2. Validação de modelo

A natureza do método dos elementos finitos evidencia a necessidade de comparar os resultados obtidos pela simulação com algum parâmetro demonstrativo da situação real. Dessa maneira pode-se estabelecer um certo grau de confiabilidade dos resultados da simulação através da análise do erro entre esses dois parâmetros.

Nesse sentido, a validação do modelo numérico foi realizada por meio da comparação entre os resultados teóricos e computacionais no para-choque durante simulações de impacto frontal. Esse componente foi escolhido por ser o principal responsável pela absorção da carga mecânica inicial em colisões frontais, sendo atingido quase exclusivamente nesse tipo de impacto. Assim, essa situação se mostrou ideal para ser comparada com um modelo teórico de viga.

Para a análise, foi utilizada uma viga bi-apoiada com comprimento equivalente ao membro para-choque do chassi (270 mm). Foi aplicada uma carga distribuída de mesma magnitude à calculada para o impacto, e os deslocamentos obtidos computacionalmente foram comparados com os deslocamentos gerados teoricamente. A Figura 5 ilustra a viga em questão.

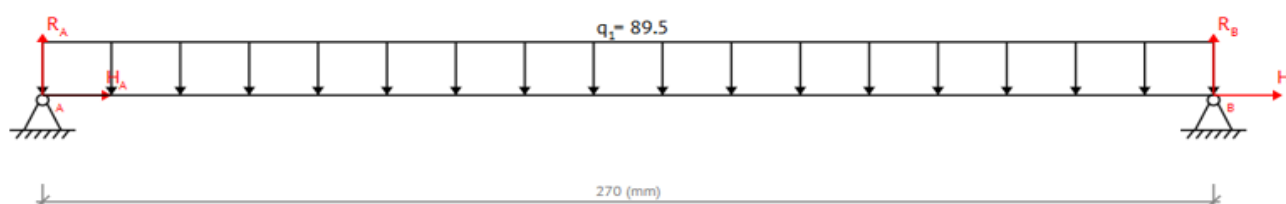


Figura 5. Modelo de viga teórica

O deslocamento máximo para vigas bi-apoiadas sob condição de carregamento distribuído é apresentado pela Equação (2) (Hibbeler, 2010).

$$\delta = \frac{-5 * q * L^4}{384 * E * I} \quad (2)$$

onde:

- δ – Flecha causada pelo carregamento;
- q – Carga distribuída;
- L – Comprimento da viga;
- E – Módulo de elasticidade do material;
- I – Momento de inércia de área da seção transversal.

A Figura 6 mostra a forma da linha elástica para esse tipo de carregamento e condição de vinculação. Nela, observa-se que o deslocamento máximo encontrado para esse tipo de viga se encontra na metade da viga, com o mesmo sentido da aplicação da carga.

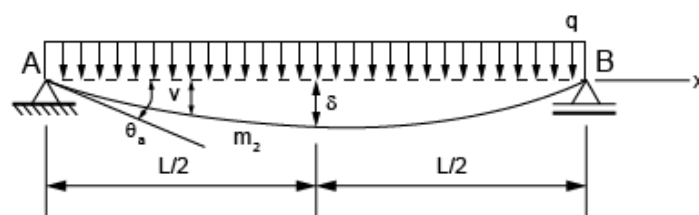


Figura 6. Linha elástica para viga bi-apoiada sob carregamento distribuído
 Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados da validação de modelo

Como dito anteriormente, a validação de modelo para as análises estáticas foi feita através da comparação dos resultados de deslocamento máximo no para-choque, calculados computacionalmente e teoricamente. Dessa forma, o resultado de deslocamento para a barra analisada calculado computacionalmente pode ser observado na Figura 7.

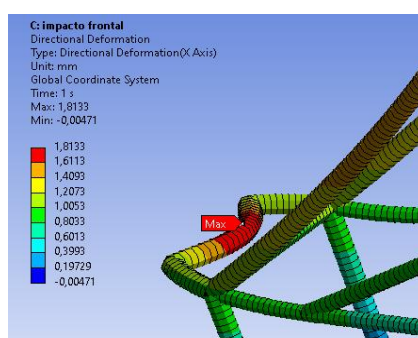


Figura 7. Deslocamento direcional no para-choque

A análise da Figura 7, evidencia que o deslocamento direcional máximo foi de 1,81 mm, localizado no ponto médio do tubo frontal, e no mesmo sentido de aplicação da força, corroborando com o modelo teórico de linha elástica.

Neste sentido, a Tabela 5 apresenta o resultado de deslocamento calculado teoricamente aplicando os parâmetros mencionados previamente na Equação (2) e sua comparação com os resultados expostos pela Figura 7.

Tabela 5. Resultados para deslocamento.

Deslocamento Computacional [mm]	Deslocamento Teórico [mm]	Erro Relativo
1,81	1,75	3,4 %

Observando os resultados expostos pela Tabela 5, percebe-se que o deslocamento teórico, calculado pela Equação (2) foi de 1,75 mm localizado na metade do comprimento da viga e com

diferença de 0,06 mm em valor absoluto do resultado apresentado pela Figura 7. Além disso, a Tabela 5 mostra que a medida de deslocamento calculada pelo modelo computacional se difere da calculada pelo modelo teórico em 3,4%, caracterizando baixa divergência relativa entre os resultados. A conformidade apresentada pelos resultados demonstra a qualidade do modelo computacional proposto, já que este, não só apresenta resultados compatíveis de deslocamento, como também apresenta similitude na forma de deformação da viga com a linha elástica teórica.

3.2. Análise estática de impacto frontal, lateral e capotamento

Tomou-se a análise de impacto frontal como ponto de partida, já que ela representa a situação de maior ocorrência em se tratando de acidentes no meio automobilístico. Além disso, representa a situação em que mais ocorrem fatalidades decorrentes dos impactos. A Figura 8a apresenta os resultados das tensões de von Mises atuantes na estrutura do chassi devido a situação de impacto frontal, a Figura 8b mostra o deslocamento máximo para essa simulação. A Figura 8c apresenta o resultado das tensões de impacto lateral.

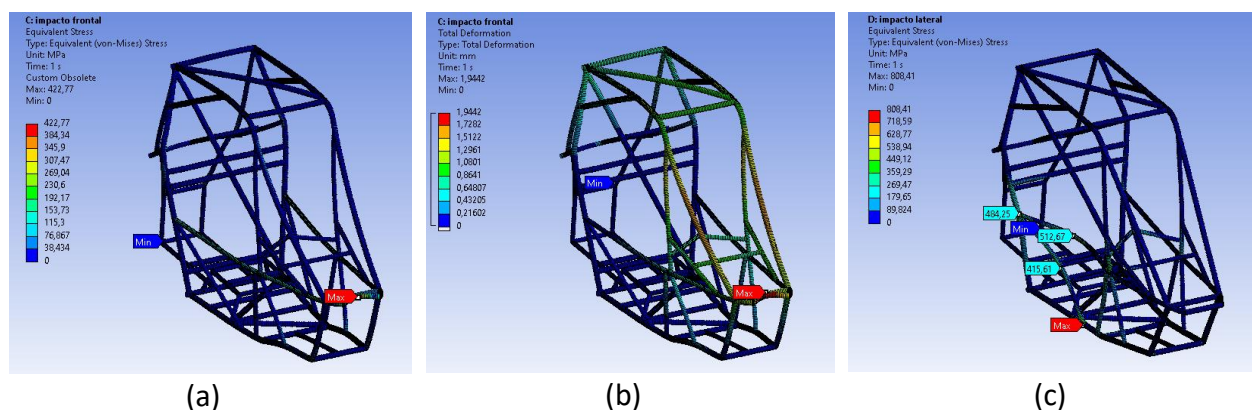


Figura 8. Resultados das simulações - a) tensões para impacto frontal; b) deslocamentos para impacto frontal e c) tensões para impacto lateral.

Como pode ser observado na Figura 8a, a tensão equivalente de von Mises máxima ocorre no para-choque em que a força foi aplicada no modelo. A magnitude da tensão 422,77 MPa não ultrapassa a tensão limite de escoamento do material, não ocorrendo deformações plásticas em nenhum ponto da estrutura. A análise dos deslocamentos mostrados pela figura 8b mostra que o deslocamento máximo calculado pelo método computacional foi de 1,94 mm, também no para-choque. Dessa forma, é possível afirmar que, na ocorrência desse tipo de impacto, o piloto estaria seguro, uma vez que não ocorreriam deformações plásticas ou rompimentos nos membros do chassi, além dos deslocamentos serem pequenos em magnitude e de sentidos contrários a área do habitáculo, como sugere o regulamento.

A análise da Figura 8c, evidencia diversos pontos em que a tensão equivalente é maior que a tensão de escoamento e a tensão de resistência à tração. A tensão máxima encontrada (808,41 MPa) se dá na junção inferior do travamento entre o tubo SIM (*Side Impact Member*) e o tubo LFS (*Lower Frame Side Member*), região submetida ao processo de soldagem. Portanto, existe grande chance dessa situação de impacto ocasionar a ruptura da estrutura no ponto solda. Além disso, a

tensão decorrente do impacto na região central do tubo SIM ultrapassa ao limite de escoamento do aço SAE 4130, caracterizando deformação permanente no tubo.

Apesar do rompimento iminente no travamento entre o SIM e o LFS e a deformação plástica no SIM para essa situação, na avaliação de casos como estes, para a garantia de segurança do piloto, é importante a análise do tamanho dos deslocamentos provocados pelo impacto, e se estas são suficientes para atingir o piloto dentro do *cockpit*. As Figuras 9a, 9b e 9c apresentam o resultado dos deslocamentos máximos para impacto lateral, tensões para o capotamento e os deslocamentos para o capotamento respectivamente.

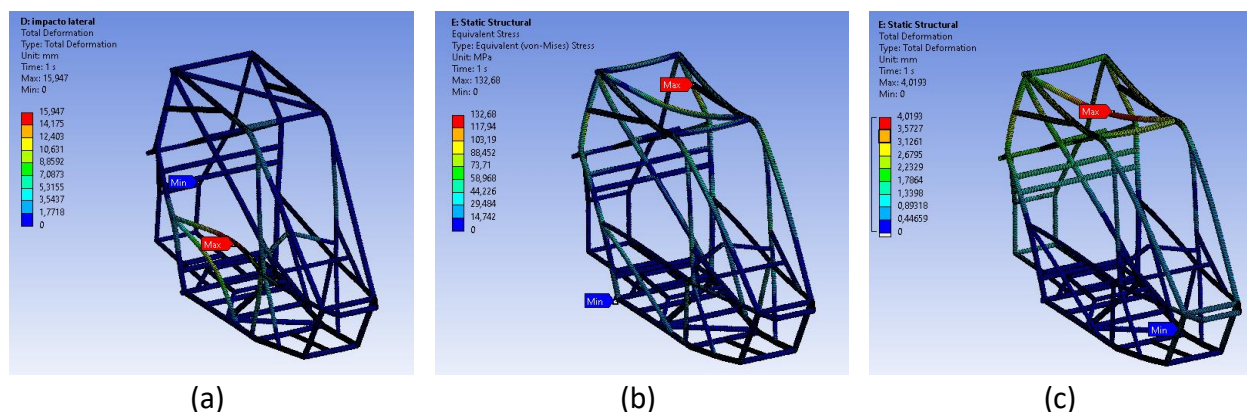


Figura 9. Resultados das simulações - a) deslocamentos para impacto lateral; b) tensões para capotamento e c) deslocamentos para capotamento.

Ao examinar a Figura 9a, é demonstrado que o deslocamento máximo ocorrido na geometria é de 15,95 mm na região central do tubo SIM. De acordo com o item B6.1.4.1 do RATBSB, qualquer membro do corpo do piloto deve ter uma folga mínima de 76,0 mm até o chassi, dessa forma o maior deslocamento ocorrente na geometria simulada não chegaria a tocar no piloto, apontando a segurança deste em caso de impacto lateral.

É demonstrado pelo exame da Figura 9b que a tensão máxima decorrente do cenário de capotamento é de 132,68 MPa, valor abaixo da tensão de escoamento do material. Contudo, esse valor se dá em um ponto de união soldada na estrutura, o que leva a necessidade da realização de análises adicionais, caso essa situação de capotamento venha a acontecer na realidade.

Com base na Figura 9c, é possível observar que o deslocamento máximo, de aproximadamente 4,01 mm, encontrado na região superior da estrutura, é menor que a folga exigida pelo item B6.1.3.1 do RATBSB que menciona que o capacete deve estar a pelo menos 152,00 mm de distância de uma reta aplicada a quaisquer dois pontos dos membros do chassi. Assim, pode-se garantir que, em uma situação de capotamento, o deslocamento dos tubos superiores não causaria riscos à segurança do piloto.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal conduzir a validação estrutural do chassi desenvolvido para a Equipe Cerrado Baja, empregando uma metodologia baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF). As simulações realizadas focaram na avaliação das tensões e

deslocamentos decorrentes de cenários críticos, incluindo impactos frontais, colisões laterais e situações de capotamento. O modelo proposto foi posto à validação mediante a comparação do resultado computacional com os resultados obtidos pela teoria pertinente, para a situação de impacto frontal. O processo de validação demonstrou boa semelhança entre os resultados teóricos e computacionais, demonstrando a confiabilidade do modelo.

Os resultados das análises estáticas demonstraram comportamento estrutural diferenciado em cada situação. Na situação de impacto frontal, as tensões máximas permaneceram abaixo do limite de escoamento do aço SAE 4130, e os deslocamentos computados foram pequenos, não demonstrando riscos de plastificação ou contato com o piloto no caso da ocorrência do impacto. No cenário de impacto lateral, foi identificado um ponto de provável ruptura na junção dos membros SIM e LFS, com tensão equivalente maior que a resistência à tração do material, entretanto a análise dos deslocamentos máximos não identificou risco de invasão do habitáculo, respeitando as normas do RATBSB. Para a circunstância de capotamento, tanto os valores de tensão como de deslocamento ficaram abaixo dos limites críticos estabelecidos pela literatura e pelas normas do RATBSB, o que demonstra robustez do projeto na proteção à integridade do piloto mesmo em condições adversas.

Portanto, pode-se concluir que o chassi estudado atende às exigências normativas e funcionais para veículos Baja SAE, garantindo a integridade estrutural nos cenários de impacto frontal e capotamento, e a segurança do piloto ante o cenário de impacto lateral.

5 REFERÊNCIAS

- Agaram, V., Xu, L., Wu, J., Kostyniuk, G., & Nusholtz, G. (2000). Comparison of frontal crashes in terms of average acceleration [Apresentação de artigo]. SAE 2000 World Congress, Detroit, MI, Estados Unidos. Sae Publications Group.
- Alves, A. F. (2012). Elementos finitos: A base da tecnologia CAE - Análise não linear. Érica.
- American Society for Metals. (1983). Asm metals reference book: A handbook of data about metals and metalworking (2. ed.). Asm International.
- Andrade, A. G. (2022). Análise estrutural de chassi tipo spaceframe veículo off-road tipo Baja Sae [Trabalho de Conclusão de Curso]. Instituto Federal do Espírito Santo.
- Ansys, Inc. (s.d.). BEAM 188. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html
- Barroso, D. A., Bessa, J. A., Bezerra, C. A. D., de Moraes, J. L., & Alexandria, A. R. de. (2015). Análise do balanço da suspensão do protótipo Fórmula SAE por método de elementos finitos. HOLOS, 5, 170–181. <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2189>

- Cézar, É. S. (2017). Análise dinâmica e estrutural de um chassi tubular através de elementos finitos com validação experimental [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Pampa.
- Euro NCAP. (2024). Crash protection frontal impact (9. ed.). <https://www.euroncap.com/media/85407/euro-ncap-protocol-crash-protection-frontal-impact-v09.pdf>
- Hibbeler, R. C. (2010). Resistência dos materiais (7. ed.). Pearson Prentice Hall.
- Kurowski, P. M. (2015). Finite element analysis for design engineers. Society of Automotive Engineers International, Inc.
- Latin NCAP. (2021). Impacto frontal. <https://www.latinncap.com/po/nossos-testes/passageiro-adulto/impacto-frontal>
- Latin NCAP. (s.d.). Side impact test. <https://www.latinncap.com/en/our-tests/adult-occupant/side-impact-test>
- Lottermann, J. P. T. (2014). Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibaja: Análise numérica e experimental [Dissertação de Mestrado]. Universidade de Brasília.
- Mecânica Online. (2019, 20 de abril). Quanto tempo dura um acidente? Entenda como acontecem crash test frontal, lateral e contra um poste [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=7RDIqoZ10VE>
- SAE Brasil. (2024). Programas estudantis. <http://www.saebrasil.org.br>
- Seward, D. (2014). Race car design. Palgrave Macmillan.
- Shah, S. (2021). Static structural analysis of SAE Baja chassis. International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, 7(3), 1281–1285.
- Wilson, L., & Haight, S. H. (2012). Dynamics of vehicle-to-vehicle side impact crash tests. Collision: The International Compendium for Crash Research, 7(2), 10–21.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Oliveira Filho, R. H. de, Nishida, P. P. R., Guimarães, T. A., & Sousa, G. H. T. ANÁLISE ESTRUTURAL DE CHASSI DE VEÍCULO BAJA SAE UTILIZANDO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. *HOLOS*, 4(41). <https://doi.org/10.15628/holos.2025.18855>

SOBRE OS AUTORES**R. H. DE OLIVEIRA FILHO**

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia/UFU; Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM (Brasil).



E-mail: rhofilho@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-9410>

P. P. R. NISHIDA

Professor da Universidade Federal de Uberlândia (Faculdade de Engenharia Mecânica).

E-mail: pedronishida@ufu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1640-5980>

T. A. GUIMARÃES

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

E-mail: tobias.guimaraes@uftm.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6350-7867>

G. H. T. SOUSA

Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Uberlândia (Faculdade de Engenharia Mecânica).

E-mail: gabrielteodoro@ufu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-8182-8744>

Editora Responsável: Gustavo Fontoura Souza

Pareceristas *Ad Hoc*: Neil de Medeiros e Ricardo Breganon



Recebido 23 de julho de 2025

Aceito: 18 de novembro de 2025

Publicado: 23 de dezembro de 2025