



## ANÁLISE COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA ESTRUTURA ROPS SOB AÇÃO DE CARGAS DE IMPACTO

**Camila Marinho Clemente**

**Suzana Moreira Ávila**

camila.mcclemente@gmail.com

avilas@unb.br

Universidade de Brasília – Faculdade Gama

St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240, Brasil

**Resumo.** *Uma Estrutura de Proteção em Capotamento (ROPS – Roll Over Protectoin Structure) é um sistema de segurança veicular responsável por garantir a integridade dos tripulantes em situações de capotamento. A ação dessa estrutura consiste em impedir que as cargas de impacto que agem sobre a carroceria em sucessivos tombamentos a deformem de modo a invadir o DVL (Deflection Limiting Volume, ou Volume Limite de Deflexão), ao mesmo tempo em que assegura que a energia associada não seja repassada ao condutor ou passageiros. Seu uso, atualmente, está ligado a veículos agrícolas, de mineração, de defesa civil e de esportes automotores, sendo, assim, regulado por associações responsáveis por tais setores. Neste trabalho, será realizada uma análise computacional a respeito do comportamento mecânico de uma estrutura ROPS, desenvolvida para um veículo HUMMER, sob a ação de carregamentos dinâmicos (cargas de impacto), baseando-se nas especificações determinadas pela FIA (Federação Internacional de Automobilismo) e pela Norma Australiana.*

**Palavras-chave:** *ROPS, Ansys, carregamentos dinâmicos, impacto.*

## 1 INTRODUÇÃO

A segurança veicular tornou-se, nas últimas décadas, matéria de estudo e pesquisa tanto no meio acadêmico, quanto no industrial. Estatísticas sobre acidentes automotivos, desenvolvimentos de testes de segurança, aplicação de estruturas protetivas e o surgimento de normas e legislação específica à segurança veicular (CHRISTENSEN & BASTIEN, 2016) apresentam-se, atualmente, como fatores indispensáveis ao mercado automotivo, sendo, inclusive, características utilizadas em comparativos entre montadoras na busca dessas pela liderança do mercado.

Assim, surgiram, e popularizaram-se, mecanismos como *airbags*, freios ABS, plataformas com melhor absorção de impacto, dentre outros, que objetivam garantir, cada vez mais, a integridade física dos tripulantes de um veículo em situações de acidente. Contudo, as evoluções em segurança não ficaram restritas aos setores populares das linhas automotivas, alcançando, também, áreas de máquinas pesadas, como agrícolas e de mineração, e o setor de autoesporte.

Nesses setores, uma das estruturas que revolucionaram no quesito segurança é o ROPS, sigla em inglês para Estrutura de Proteção contra Capotamento (*Roll-over protection structure*). Integrante obrigatório na maioria das categorias do esporte automotor, essa *gaiola* protetiva tem sido cada vez mais presente em veículos agrícolas e de mineração, onde tombamentos e capotamentos são listados entre as maiores causas de fatalidade (REYNOLDS & GROVES, 2000). Essa estrutura, inclusive, já é pauta de legislação e normatização por instituições especializadas, como a Federação Internacional de Automobilismo (FIA), e os institutos normatizadores de diversas nações.

O crescimento da importância dessa estrutura de proteção motivou a elaboração deste trabalho, o qual objetiva analisar uma estrutura ROPS, computacionalmente, observando os critérios descritos pela FIA (2014) de projeto da estrutura considerando as cargas descritas por Sandoval (2014), em concordância com a norma australiana AS 1636. A estrutura apresentada é compatível com um veículo HUMMER, modelo militar HMMWV Humvee H1, adaptável para competições em Rali. Apresentam-se as seguintes análises: estática, modal, harmônica e transiente, utilizando o pacote de elementos finitos ANSYS. Vale ressaltar que todas as cargas foram multiplicadas por fatores dinâmicos estabelecidos em norma AS 1636.

## 2 METODOLOGIA

Foram realizadas quatro tipos de simulações computacionais, utilizando o pacote computacional ANSYS: análise estática, análise modal, análise harmônica e análise transiente, repetindo-se para cada um dos carregamentos associados – lateral, vertical e frontal. A modelagem da estrutura, as cargas e seus pontos de aplicação foram definidos baseados nas normas relacionadas a ROPS, utilizando um fator dinâmico para observar as influências de um carregamento correspondente ao de impacto sobre o ROPS.

### 2.1 Estratégia de pesquisa

Este trabalho foi estruturado a partir de uma pesquisa literária a respeito do tema abordado, ROPS, considerando as legislações pertinentes, em especial os parâmetros da Norma Australiana AS 1636 apontada por Sandoval (2014) e o Regulamento da FIA – Artigo 253/2015, Apêndice J – Art. 8. Definiram-se ainda as propriedades mecânicas da estrutura, o

comportamento esperado do ROPS e os tipos de sistemas existentes. Em seguida, verificou-se se o software escolhido seria adequado às análises requeridas, identificando os parâmetros de entrada adequados e quais resultados, ou saídas, seriam obtidos.

## 2.2 Modelagem

A modelagem da estrutura, Fig. 1, estudada foi realizada no software Catia V5 e importada para o Ansys, onde se realizaram as simulações, em formato *sessions*. Para o desenho do ROPS, foram respeitadas as dimensões aproximadas da cabine do veículo HUMMER, modelo militar HMMWV Humvee H1, listadas na Tab. 1, e as especificações definidas pela FIA (2014) no apêndice J, artigo 253.

Tabela 1. Dimensões da cabine do HUMMER

Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1258	1950	2044

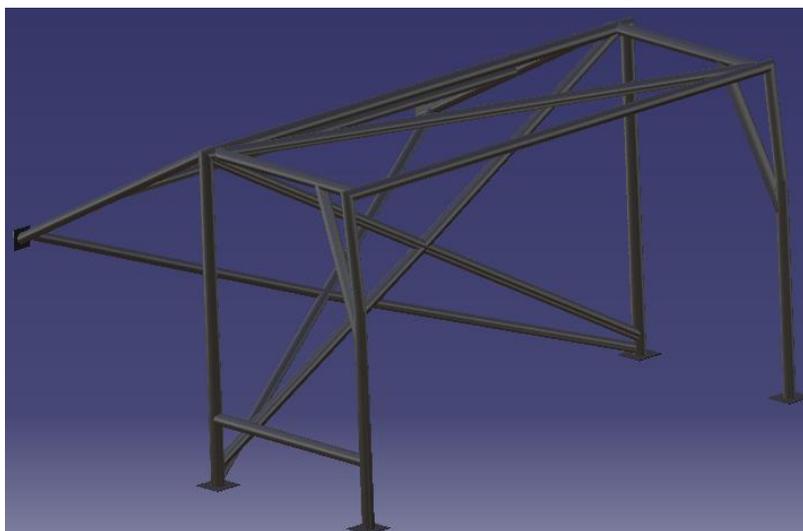
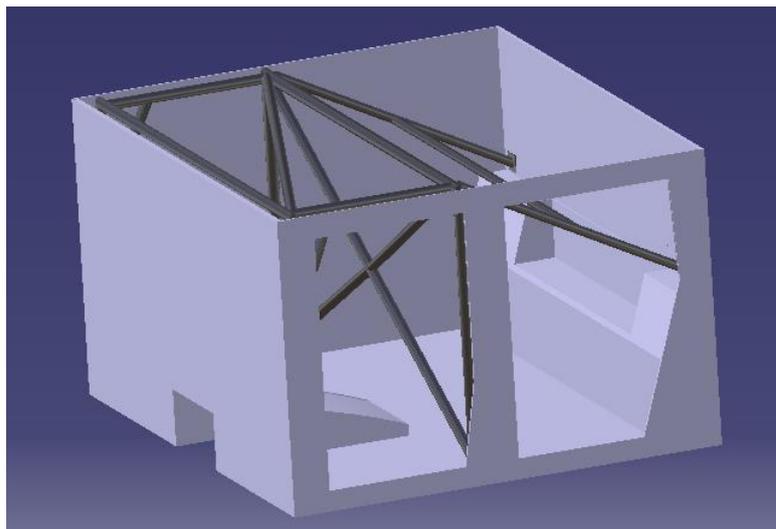


Figura 1. Modelo em CAD do ROPS.

Também foi modelada a cabine do veículo Hummer, de modo a observar a montagem do ROPS internamente ao automóvel. A Figura 2 mostra o conjunto ROPS-Hummer de acordo com a modelagem em computacional.



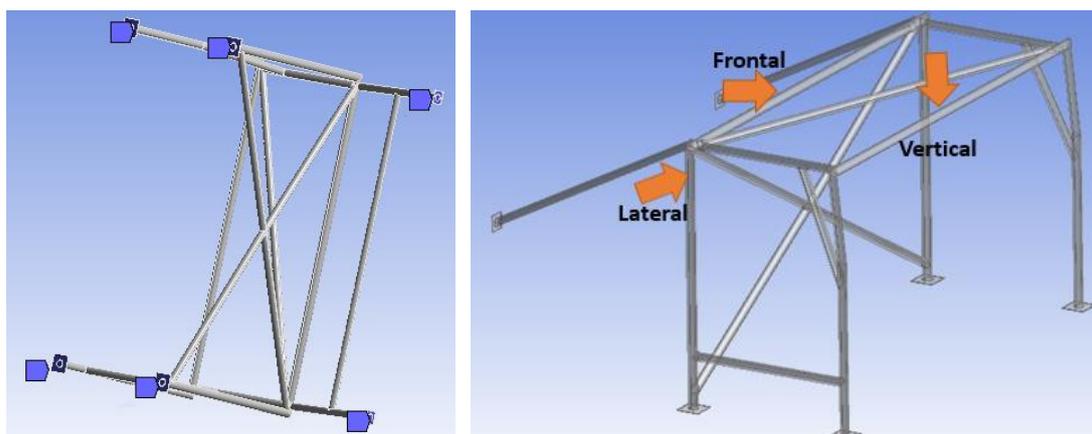
**Figura 2. Modelo em CAD do ROPS instalado na cabine.**

### **2.3 Parâmetros de análise**

Para as análises computacionais, foram definidos parâmetros de entrada do software, similares aos encontrados na literatura e em estudos semelhantes (SANDOVAL, 2014). Algumas entradas, como a geometria estudada e o material utilizado, foram os mesmos para todas as simulações, enquanto outros, como carga e ponto de aplicação, variavam de acordo com as necessidades específicas requeridas pela análise. A seguir, lista-se os parâmetros adotados para cada análise:

#### *Parâmetros gerais*

Os parâmetros gerais, associados às quatro análises realizadas, podem ser relacionados quanto à ferramenta computacional (software Ansys v13), o material (Aço estrutural – Módulo de Young de  $2 \times 10^{11}$  Pa; Coeficiente de Poisson de 0,3), a massa da estrutura e do veículo, respectivamente 73.124 kg e 2850 kg, os pontos de apoio (engaste) da estrutura e os pontos de aplicação de carga, expostos na Fig. 3, e as cargas submetidas (vertical de 11799,8 N, lateral de 41930 N e frontal de 27952 N).



**Figura 3. (a) Pontos de apoio; (b) Pontos de aplicação das cargas**

### *Parâmetros Específicos – Análise Estática*

A análise estática consiste em observar uma estrutura sob a ação de carregamentos constantes. Neste trabalho, como os carregamentos já consideravam um fator dinâmico, foi possível analisar a estrutura estaticamente e associar o carregamento à uma situação dinâmica.

### *Parâmetros Específicos – Análise Modal*

A análise Modal determina as frequências naturais para os modos de vibração associados. Na análise exposta neste trabalho, a estrutura foi engastada nos pontos de apoios já indicados (Fig. 3(a)), e foram obtidas as frequências para 15 modos de vibração (Tab. 2). A malha utilizada, comum às outras análises, gerou 46689 elementos, do tipo tetraédrico de aproximadamente 0,04 m cada, e 90339 nós.

### *Parâmetros Específicos – Análise Harmônica*

A análise Harmônica observa o comportamento da estrutura sobre cargas cíclicas, sendo possível obter a resposta em frequência do sistema. Na análise harmônica realizada neste trabalho, a estrutura foi engastada nos pontos já indicados e exposta, separadamente, às três cargas de trabalho associadas à uma situação de capotamento, que correspondem às já citadas: vertical de 11799,8 N, lateral de 41930 N e frontal de 27952 N.

Como parâmetro de entrada, além das condições de apoio e das cargas, definiu-se a amplitude das frequências observadas, de 0 Hz a 150 Hz, o número de intervalos como 200 e as frequências mais importantes – aquelas próximas às frequências naturais obtidas na análise modal.

### *Parâmetros Específicos – Análise Transiente*

A análise transiente fornece a resposta da estrutura no domínio do tempo. Para realizar esse tipo de análise, o intervalo de tempo considerado foi de 0,02s, mantendo as mesmas condições de apoio utilizadas anteriormente.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 Análise Estática**

A análise estática mostrou que a estrutura modelada suporta os carregamentos submetidos, apresentando uma deformação elástica máxima de 0,028 m, sob carga vertical, como mostrado na Fig. 4. Como tal deformação não seria suficiente para invadir o Volume Limite de Deflexão (*DLV – Deflection Limit Volume*), a estrutura é eficaz em proteger os ocupantes do veículo.

É interessante ressaltar que a deformação máxima ocorre na junção de dois tubos, e não no decorrer da viga frontal. Uma possível explicação a este fato é a concentração de tensões comuns a quinas e vértices de ângulos. No que tange a segurança dos ocupantes, tal fator pode ser considerado positivo, uma vez que a deformação máxima é encontrada em um ponto distante do setor ocupado pelas pessoas dentro do veículo.

As deformações máximas causadas pelas cargas lateral e frontal correspondem à 3 mm e 4 mm, respectivamente. São, portanto, inexpressivas quando comparadas ao tamanho da estrutura total.

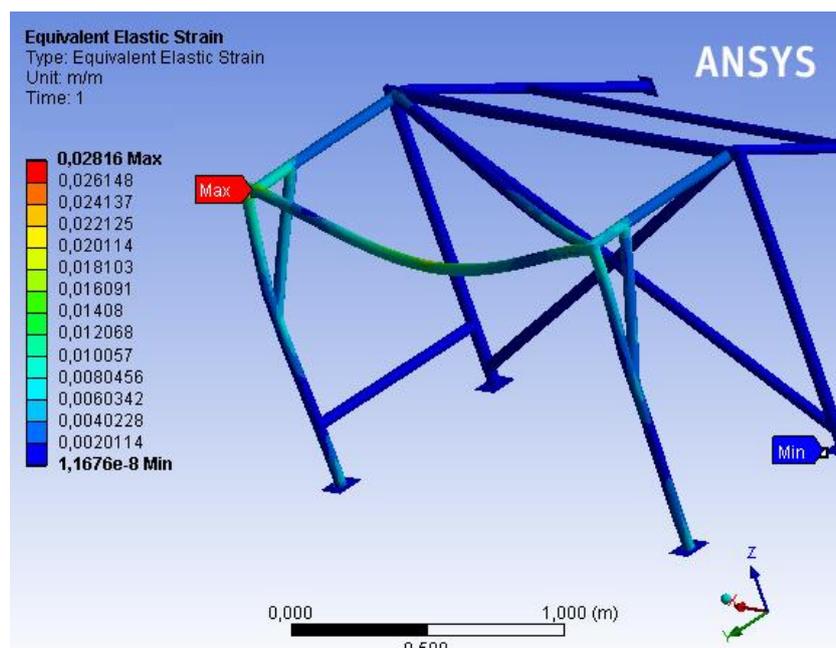


Figura 4. Deformação Elástica Máxima sob carregamento estático

### 3.2 Análise Modal

Na análise modal, obteve-se as frequências naturais da estrutura, considerando a mesma engastada nos pontos de apoio. As frequências obtidas, apresentadas na Tab. 2, são elevadas e provam a robustez da estrutura.

Para cada frequência natural, há uma forma modal associada, a qual indica como a estrutura vibra naquela frequência. Foram obtidas as formas modais para as primeiras 15 frequências naturais. Na Fig. 5, apresenta-se a forma modal associada à frequência de 56,74 Hz. Esta frequência não se encontra dentro da faixa das frequências de operação do sistema, portanto dificilmente este modo será excitado.

Tabela 2. Frequências naturais da estrutura

	Modo	Frequência (Hz)
<b>1</b>	1	38,758
<b>2</b>	2	39,828
<b>3</b>	3	44,851
<b>4</b>	4	46,692
<b>5</b>	5	50,55
<b>6</b>	6	52,469
<b>7</b>	7	56,74
<b>8</b>	8	59,715
<b>9</b>	9	65,565
<b>10</b>	10	66,911
<b>11</b>	11	94,311
<b>12</b>	12	96,159
<b>13</b>	13	101,07
<b>14</b>	14	107,76
<b>15</b>	15	109,82

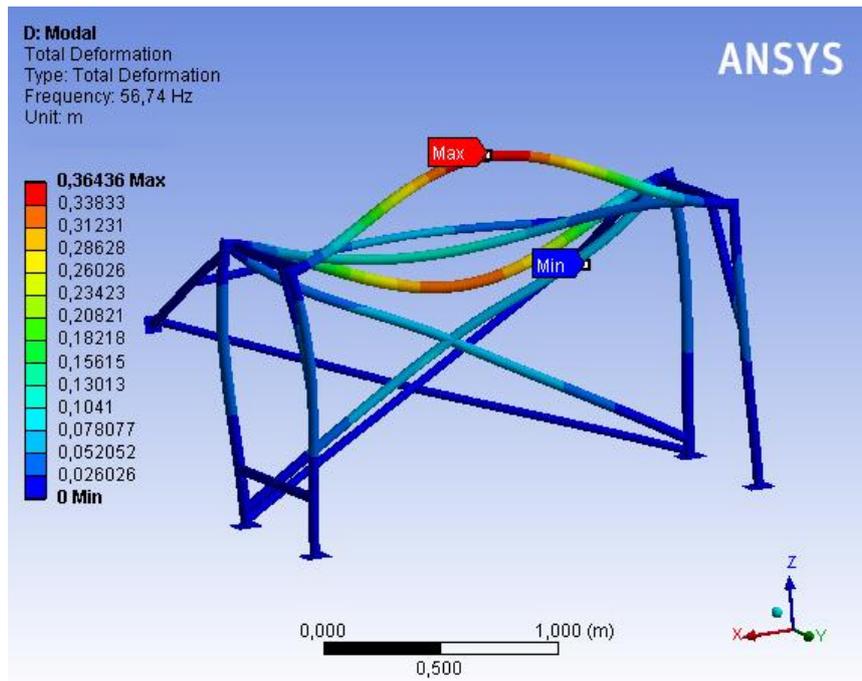


Figura 5. Sétima forma modal ( $f = 56,74$  Hz).

### 3.3 Análise Harmônica

As análises harmônicas forneceram a resposta do sistema no domínio da frequência sob a ação das cargas relacionadas ao capotamento, ou seja, estimam como a estrutura se comportará durante o capotamento considerando suas frequências naturais. As Figs. 6, 7 e 8 apresentam, respectivamente, a amplitude da resposta em frequência devido a aplicação da carga vertical, lateral e frontal.

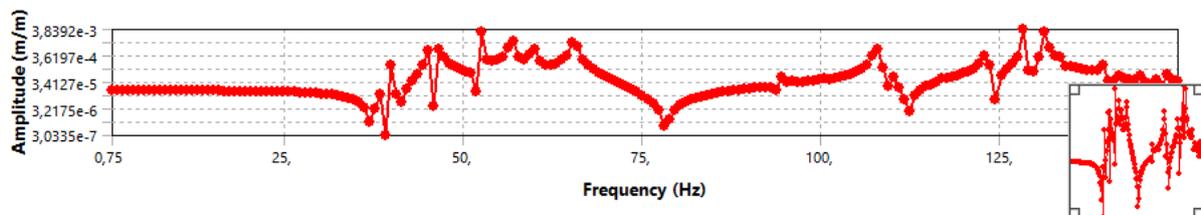


Figura 6. Resposta da frequência para a carga vertical.

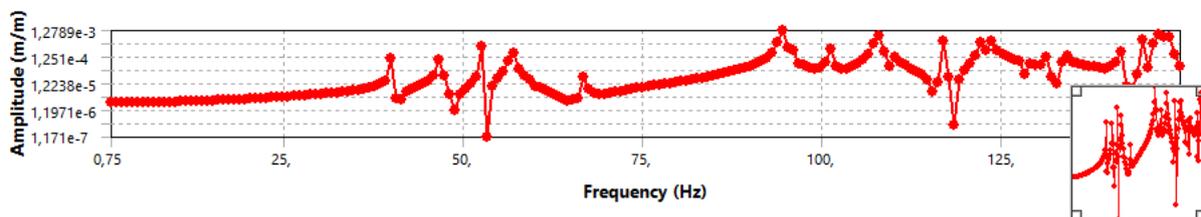


Figura 7. Resposta da frequência para a carga lateral.

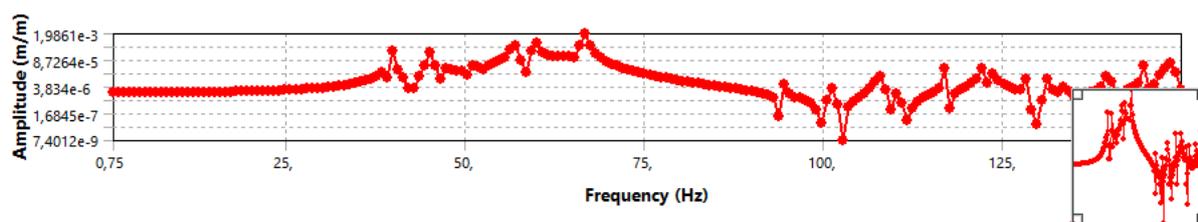


Figura 8. Resposta da frequência para a carga frontal.

As amplitudes baixas vão em encontro com o esperado de uma estrutura de proteção, uma vez que a aplicação das forças não provocam altas deformações na faixa de frequência estudada.

### 3.4 Análise Transiente

Para as análises transientes, observou-se o comportamento da estrutura quando esse é submetida a uma carga impulsiva, isto é, uma carga aplicada em um pulso por um tempo muito pequeno (Fig. 9). Ao ROPS, tal análise é importante pois exige-se da estrutura um comportamento de absorção de impacto durante o capotamento, onde cargas elevadas são aplicadas por curtos espaços de tempo. Os resultados obtidos mostraram que as cargas submetidas provocaram deformações muito pequenas na estrutura. A maior deformação apresentada foi causada pela carga vertical, aplicada no local indicado na Fig. 4, e alcançou valores de 0,0285 m. A Fig. 9 apresenta a evolução da força aplicada no tempo (em Newtons), e a deformação associada é mostrada na Fig. 10. Na Fig. 11, mostra-se a deformada na estrutura, causada pela carga vertical aplicada na barra frontal do ROPS.

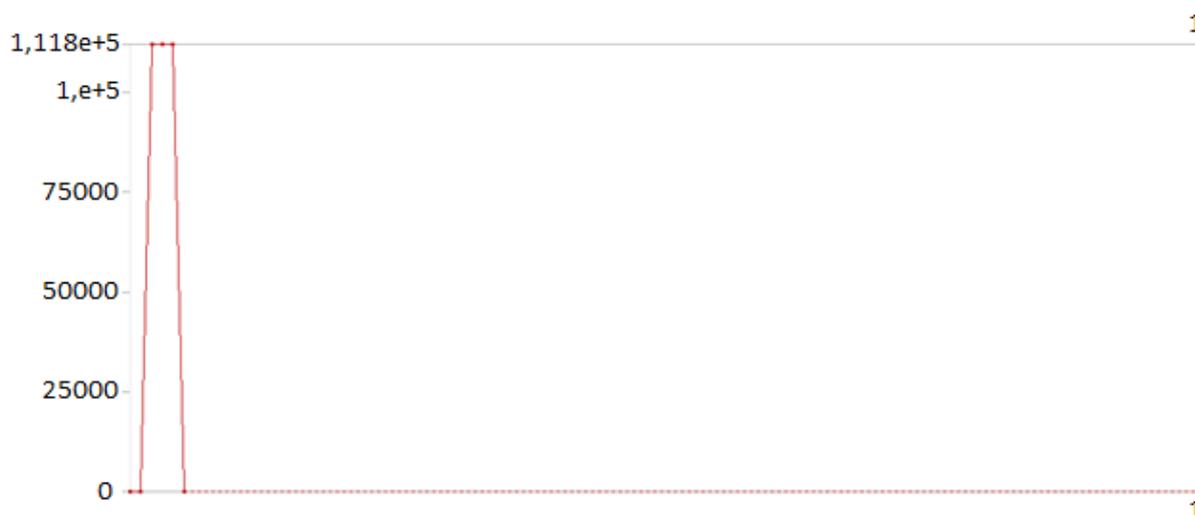


Figura 9. Carga vertical aplicada (N)

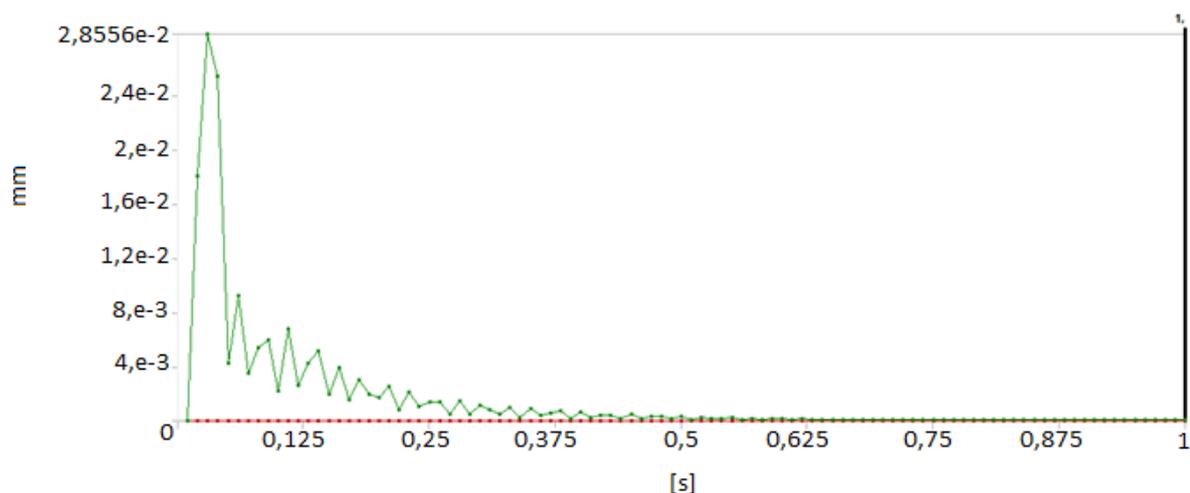


Figura 10. Evolução no tempo da amplitude do deslocamento na barra frontal

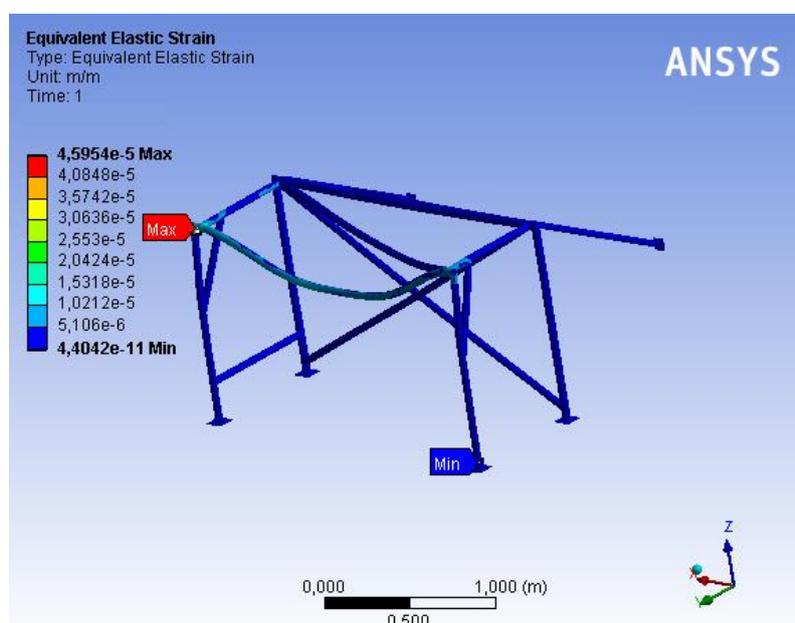


Figura 11. Deformada da estrutura submetida a carga vertical impulsiva

## 4. CONCLUSÃO

As estruturas de proteção contra capotamento, ROPS, são extremamente eficazes em sua função de proteger a integridade física dos ocupantes de um veículo. Assim, fez necessária a regulamentação de tais estruturas, estabelecendo parâmetros mínimos os quais essas devem atender.

No caso de automóveis de competição, os requisitos estabelecidos levam em consideração as condições adversas em que esses devem operar, assim como em veículos agrícolas e de mineração. Portanto, a robustez da estrutura deve ser elevada, de modo a suportar as altas cargas de impacto que podem ser atribuídas.

Este trabalho considerou, dessa forma, as cargas determinadas pela Norma Australiana, como exposto por Sandoval (2014, apud AS 1636), e as características de projeto requeridas pela FIA (2014) como base das simulações. A estrutura modelada, com todos os componentes principais obrigatórios e reforços opcionais, mostrou-se eficiente em sua tarefa de suportar as cargas a ela sobrepostas, apresentando elevadas frequências naturais, as quais não serão atingidas durante sua operação, baixas deformações e invasão nula do DVL.

Assim, conclui-se que, para cargas com os fatores dinâmicos apresentados, a estrutura proposta é eficiente e atende aos requisitos apontados pelas normas observadas.

## **REFERÊNCIAS**

CHRISTENSEN, J.; BASTIEN, C. *Nonlinear optimization of vehicle safety structures: Modeling of structures subjected to large deformations*. Oxford: Elsevier, 2016.

FIA Sport/Technical Department. *Article 253 – 2015 Safety Equipment (Groups N, A, R-GT); Appendix J – Art. 253*. 2014.

REYNOLDS, J. S.; GROVES W. Effectiveness of roll-over protective structures in reducing farm tractor fatalities. *American Journal of Preventive Medicine*. v. 18, n. 4S. p.63-69, 2000.

SANDOVAL, C. F. B. *Modelos elasto-plástico e sua influência no processo de dimensionamento de componentes mecânicos*. 2014. 111f. Tese (Mestrado em Ciências Mecânicas). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

STOCKTON, A. D.; O'NEILL, D. H.; HAMPSON, C. J. *Methods for optimising the effectiveness of roll-over protective systems*. United Kingdom: HSE BOOKS, 2002.