

ESTUDO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL DA INTEGRIDADE DE CHASSI MONOBLOCO

Lucas Alves Torres, torresalveslucas@gmail.com

Universidade de Brasília, Faculdade do Gama. Área Especial, Projeção A, Setor Leste, Gama. CEP: 72444-240

Resumo. Este artigo explora métodos para levantamento de características de um chassi do tipo monobloco, uma vez que o chassi como principal elemento do veículo deve conciliar segurança e conforto. Há diversas maneiras de avaliar a integridade estrutural do chassi, uma das características mais importantes, a rigidez a torção é evidenciada neste estudo de forma a comparar seus resultados analíticos e simulados por elementos finitos. A abordagem de cada método além de suas dificuldades para interpretar a complexidade da geometria do modelo monobloco é desenvolvida em torno de um chassi simplificado com características de monobloco e outro chassi aproximado a uma caixa. É possível identificar as divergências entre os cálculos analíticos e as simulações computacionais e ainda concluir a resposta final com a convergência de malha para maior qualidade de resultados.

Palavras chave: Chassi. Monobloco. Rigidez a torção. Simulação. Convergência ...

Abstract. This article explores methods for surveying the characteristics of a monoblock type chassis, since the chassis as the main element of the vehicle must reconcile safety and comfort. There are several ways to evaluate the structural integrity of the chassis, one of the most important characteristics, the torsional stiffness is evidenced in this study in order to compare its analytical results and simulated by finite elements. The approach of each method beyond its difficulties in interpreting the complexity of the geometry of the monoblock model is developed around a simplified chassis with monoblock characteristics and another chassis approximated to a box. It is possible to identify the divergences between analytical calculations and computational simulations and also complete the final response with mesh convergence for higher quality of results

Keywords: Chassis, Monoblock, Torsional stiffness, Simulation, Convergence ...

1. INTRODUÇÃO

O principal elemento estrutural do veículo é o chassi, serve principalmente como suporte para os diversos componentes do veículo e fornece proteção para os ocupantes em acidentes com impacto além de conforto através da dissipação de ruídos e vibração.

Em um conceito inicial do desenvolvimento de um veículo, tecnologias CAE possuem métodos capazes de levantar diversos resultados, como respostas a vibração, a respeito do chassi na forma *underbody*, correspondente ao estado do veículo em uma das etapas do processo de fabricação. O *underbody* é constituído normalmente por elementos de chapas e unidos por soldas a ponto, durante um processo essencialmente mecanizado.

Além disso, segundo Happian-Smith (2002), o chassi veicular é analisado para suportar diversas condições de carregamentos, o que permite avaliar sua rigidez quanto aquela aplicação. As condições mais notórias nas análises estruturais do chassi veicular são flexão, torção, flexão-torção combinada, carregamento lateral e carregamento longitudinal. Segundo Pedersen (2018), os casos mais importantes são a flexão, torção e flexão-torção como parâmetros para determinação de uma estrutura satisfatória.

O artigo em questão propõe avaliar características estruturais de um chassi, em especial a rigidez à torção. O veículo em certas ocasiões, como em percurso com estrada irregular ou em curvas bruscas onde a força lateral é elevada, é solicitado a uma rolagem relativa entre os eixos traseiro e dianteiro, o que gera uma torção no chassi que deve ser resistida pela estrutura.

Com o intuito de avaliar a rigidez a torção de um chassi, este estudo propõe cálculos analíticos e computacionais com suas devidas limitações com base na resistência estrutural do chassi. A geometria desenvolvida para os estudos é inspirada no chassi do veículo Porsche Taycan (Fig. 1) com inúmeras simplificações para minimizar custo computacional, portanto, não se pode assumir os resultados das análises para o modelo real.

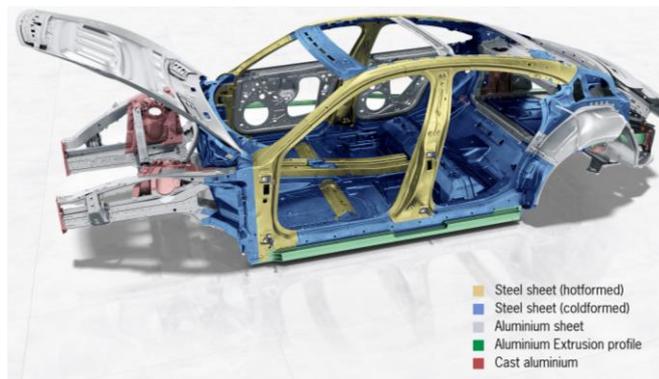


Figura 1. Chassi *underbody* Porsche Taycan (Jalopnik, 2019)

Análiticamente, os cálculos realizados para o chassi tratarão de uma geometria aproximada por caixas a fim de adequar aos perfis formulados em bibliografias de resistência dos materiais, o principal dado extraído para comparativos se trata da máxima tensão de cisalhamento e do ângulo de torção. A partir deste levantamento teórico, os estudos serão comparados a seu equivalente em elementos finitos via simulação computacional e então o modelo original será também simulado, exclusivamente, em ambiente computacional para avaliação do comportamento da estrutura e sua integridade estrutural.

Para qualidade dos resultados, a convergência de resultados em função da malha na geometria simulada é esperada, para tal, uma análise de modos de vibração (modal) será executada, esta por sua vez permite determinar as frequências naturais de uma estrutura para que se possa controlar as faixas de excitação as quais um veículo é exposto de forma a evitar a proximidade às frequências que provocam ressonância.

2. MODELO CAD

A modelagem final do chassi *underbody* (Fig. 2), realizada através do *software Catia V5 R21*, conta com diversas simplificações para facilitar a modelagem e reduzir custo computacional das simulações objetivadas. O sistema de suspensão assim como elementos *subframes* fora modelado simplificadamente para que sejam devidamente acoplados a estrutura de chassi principal.



Figura 2. Modelo CAD de chassi *underbody* com elementos de suspensão

3. METODOLOGIA DE ANÁLISES

A análise teórica realizada aplica as formulações de torção em perfil de paredes finas. O equacionamento complexo prevê o carregamento exclusivo de torção pura para seções transversais definidas, no caso em questão, será avaliado o perfil tipo caixa cuja principal equação para rigidez à torção é apresentada na Eq. 1, onde T é o momento na seção e φ o ângulo de torção calculado na Eq. 2.

$$K_T = \frac{T}{\varphi} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{T L}{4 A^2 G} \oint \frac{ds}{t} \quad (2)$$

Assim como o resultado de rigidez, é importante salientar que o carregamento aplicado não deve extrapolar do regime elástico do material que compõe o chassi, assim, cabe o equacionamento da tensão de cisalhamento máxima (Eq. 3) e da tensão equivalente conforme o critério de von-Mises (Eq. 4), adotado neste estudo.

$$\tau_{máx} = \frac{T}{2 A t_{mín}} \quad (3)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \quad (4)$$

O veículo modelado (Fig. 2) apresenta elementos complexos de chapas em sua geometria final, assim, torna-se ineficiente o cálculo analítico. A simplificação por elementos com perfis definidos em bibliografias é uma alternativa para verificação inicial da geometria original, entretanto, pode apresentar resultados não condizentes com a realidade.

A modelagem do veículo ainda pode ser dividida em setores de seção constante para facilitar mais o desenvolvimento analítico, desta forma, avalia-se a tensão máxima obtida entre as seções e, quanto a rigidez à torção, é necessário o cálculo de um valor equivalente ao conjunto como mostra a Eq. 5.

$$\frac{1}{K_T} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{K_i} \quad (5)$$

Para validação do modelo simplificado analítico e análise do modelo original do chassi, as simulações computacionais fornecem cálculos baseados em elementos finitos que permite obter respostas de tensão e deformação da geometria estudada. De posse destes resultados, verifica-se se a tensão máxima se encontra no regime elástico do material e, então, são aferidos os deslocamentos máximos das regiões onde a torção ou as forças que a provoca se encontram.

Uma outra equação surgida a partir da Eq. 1, é utilizada para o cálculo da rigidez à torção neste método computacional, a partir do binário e dos deslocamentos descritos anteriormente, como é apresentado na Eq. 6 com os ângulos necessários nas Eq. 7 e 8.

$$K_T = \frac{F S}{(\varphi_d + \varphi_e)} \quad (6)$$

$$\varphi_d = \tan^{-1} \left(\frac{z_d}{S/2} \right) \quad (7)$$

$$\varphi_e = \tan^{-1} \left(\frac{z_e}{S/2} \right) \quad (8)$$

Como mencionado na introdução, a convergência de resultados computacionais será realizada através da análise de modos de vibração (modal). O controle de elementos de malha é essencial para garantir resultados mais precisos, os quais são avaliados de acordo com sua qualidade, em prol de uma configuração que permita visualizar os resultados com tolerância aceitável de erro.

4. CHASSI SIMPLIFICADO

O modelo simplificado foi desenvolvido para desenvolvimento analítico e computacional com intuito comparativo, a geometria baseada no chassi original aparece em tom transparente na Figura 3. A composição com perfil de parede fina possui espessura constante de 0,7 mm e é composta de aço estrutural, cujas propriedades se encontram na Tabela 1.

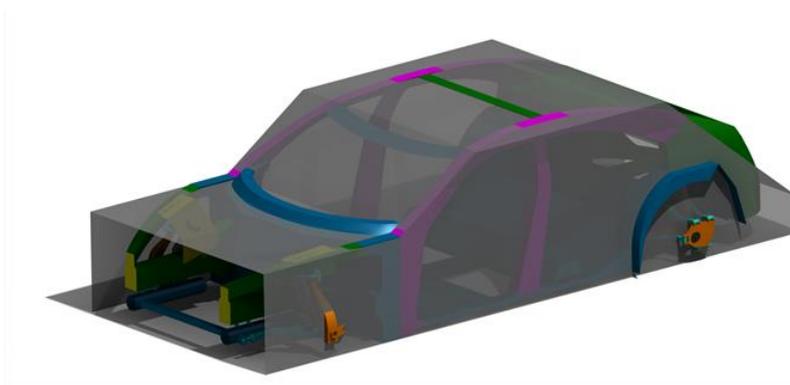


Figura 3. Modelo simplificado de chassi como invólucro do original

Tabela 1. Propriedades mecânicas do aço estrutural (Ansys 2020 R2)

Propriedade	Valor
Densidade	7850 kg/m ³
Módulo de elasticidade	207 GPa
Tensão de escoamento	350 MPa
Tensão de ruptura	590 MPa

4.1. Desenvolvimento analítico

Determinada a geometria simplificada, ainda será realizada divisões com base na seção transversal ao longo do eixo longitudinal do chassi para realização dos cálculos. Na Figura 4 consta as divisões já aplicadas e suas respectivas dimensões.

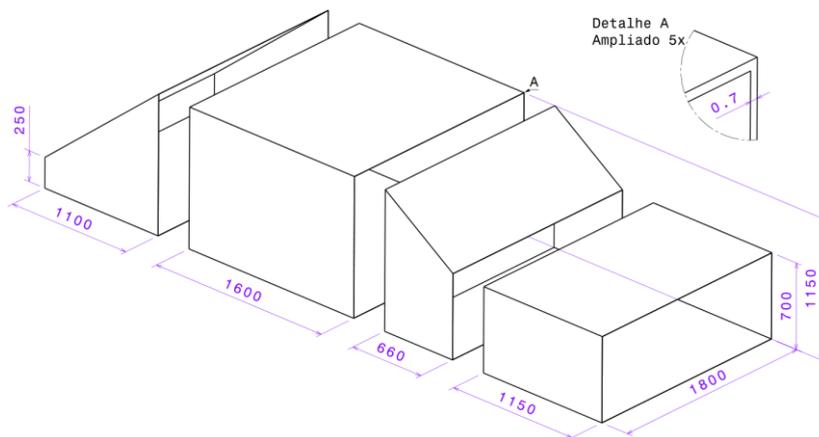


Figura 4. Divisões do chassi simplificado propostas e as correspondentes dimensões

O momento aplicado em condições de torção pura foi determinado com 1900 N·m. Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 2 para cada parte do chassi dividido, com a contagem das partes da direita pra esquerda na Fig. 4, e por último o resultado característico do chassi como todo.

Tabela 2. Resultados obtidos em cálculos pelo método analítico

	Tensão máxima de cisalhamento (MPa)	Angulo máximo de torção (°)	Rigidez à torção (kN·m/°)
Parte 1	1,08	0,00171	1108
Parte 2	1,08	0,00098	1931
Parte 3	0,66	0,00104	1823
Parte 4	3,03	0,01058	180
Chassi completo	3,03	0,01058	133

4.2. Simulação computacional

Retomado o modelo simplificado sem as divisões, o processo de simulação computacional realiza a geração de malha de superfície o qual se dá de maneira prática e com alta qualidade devido a simplicidade da geometria. Em seguida as condições de contorno (Fig. 5) são aplicadas com o momento de 1900 N·m em relação ao eixo longitudinal na face da extremidade dianteira do veículo e com o engaste da faze na extremidade traseira.

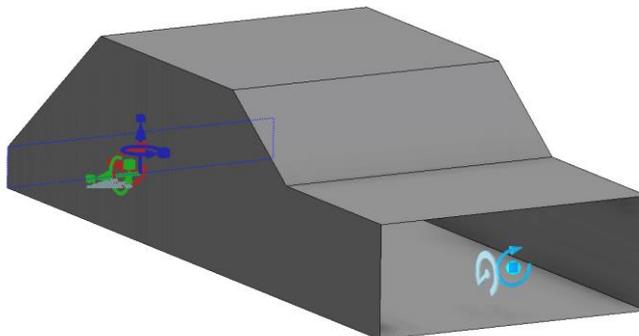


Figura 5. Condições de contorno em chassi simplificado

Os resultados seguem a sequência abordada em metodologia, uma vez que a tensão máxima de cisalhamento (Fig. 6) permanece no regime elástico do material conforme o critério de von-Mises, e a partir desta conclusão, os resultados em deslocamento direcional no eixo vertical do chassi (Fig. 7) podem ser obtidos.

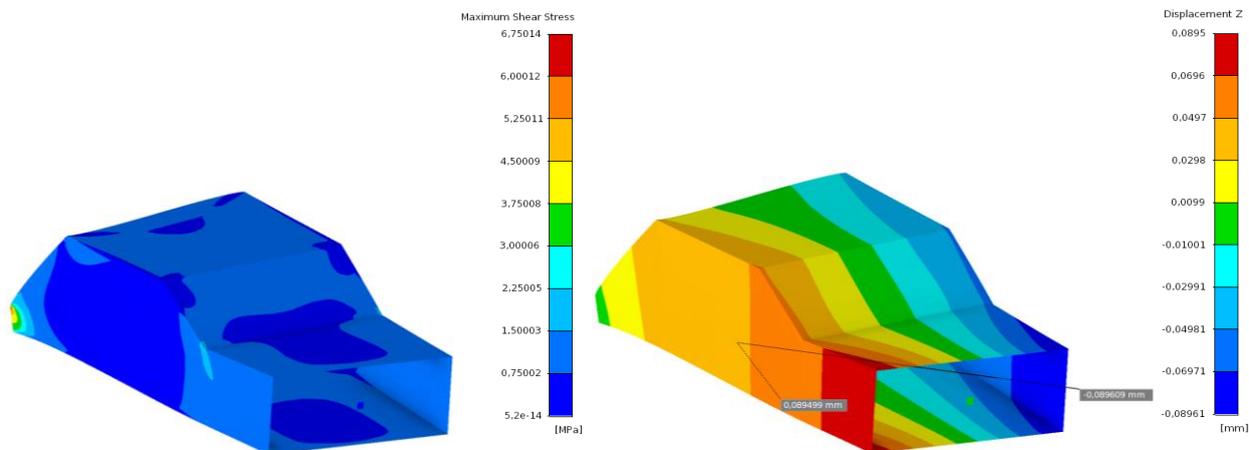


Figura 7. Tensão máxima de cisalhamento em chassi simplificado Deformação do chassi simplificado

De posse dos valores de deformação máxima na direita e esquerda do chassi, completa-se o equacionamento da rigidez à torção para o chassi. A Tabela 3 contempla os resultados do método computacional realizado em comparação aos resultados obtidos analiticamente.

Tabela 3. Resultados e comparativo entre métodos analítico e computacional

Método	Tensão máxima de cisalhamento	Rigidez à torção
Analítico	3,03 MPa	133 kN·m ^o
Simulação	6,75 MPa	176 kN·m ^o
Divergência	+ 122 %	+ 32,3 %

5. CHASSI ORIGINAL

Nesta etapa, é retomado a modelagem do veículo original para realização das análises. Inicialmente, será atribuído dois materiais para o chassi dispostos conforme a Fig. 8 de acordo com a usabilidade destes em chassis veiculares, as propriedades dos materiais ainda podem ser vistas na Tab. 4.

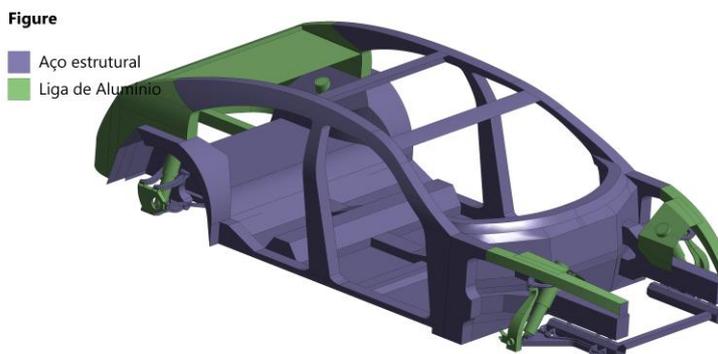


Figura 8. Materiais aplicados em modelo original de chassi

Tabela 4. Propriedades mecânicas dos materiais do chassi (Ansys 2020 R2)

Propriedade	Aço estrutural	Liga de alumínio
Densidade	7850 kg/m ³	2770 kg/m ³
Módulo de elasticidade	200 GPa	71 GPa
Tensão de escoamento	250 MPa	280 MPa
Tensão de ruptura	460 MPa	310 MPa

A primeira análise realizada objetiva a convergência dos resultados de frequência e deformação obtidas através da simulação modal. O veículo é engastado nas pontas de eixo do sistema de suspensão, uma situação em que fosse travada todas as rodas do carro, desta forma, a simulação é executada e fornece os dados de frequência e deformação modal. Uma vez que é aplicado o refinamento de malha para melhor discretização do modelo, inicia-se um estudo de convergência, cujo resultado é apresentado na Fig. 9 e demonstra a baixa variação dos resultados com a aplicação de mais refinamentos, o que sugere um trabalho eficaz com menor custo computacional.

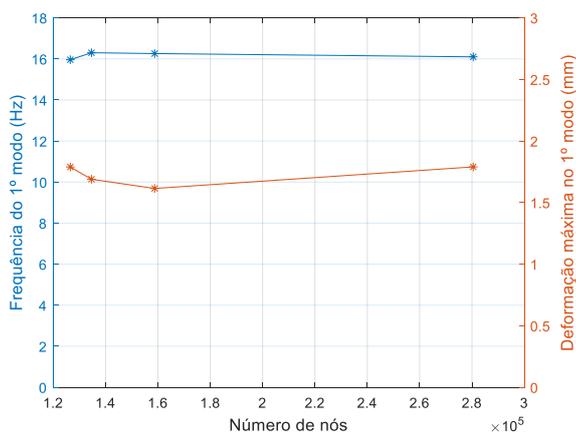


Figura 9. Gráfico de convergência de respostas de frequência e deformação em primeiro modo de vibração

Com a malha definida pelo processo de convergência, pode-se observar ainda outros modos de vibração para estrutura (Tab. 5) e ainda a resposta em deformação do primeiro modo (Fig. 10) que demonstra o movimento comum do chassi relativo ao sistema de suspensão.

Tabela 5. Frequências modais obtidas para o chassi

Modo	Frequência (Hz)
1	16,1
2	32,4
3	33,3
4	33,8
5	38,2
6	42,7

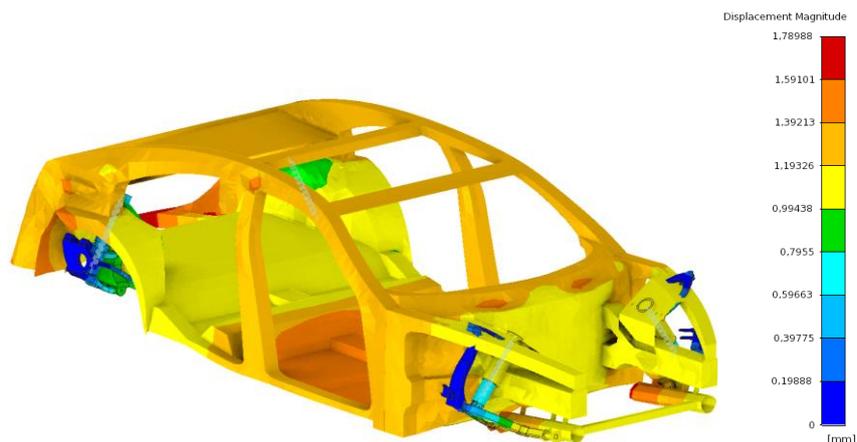


Figura 10. Resposta de deformação no primeiro modo de vibração

Por fim, a análise de torção é realizada com as condições de contorno aplicadas conforme a Fig. 11 onde os binários aplicados na direção vertical do veículo possuem intensidade de 1000 N.

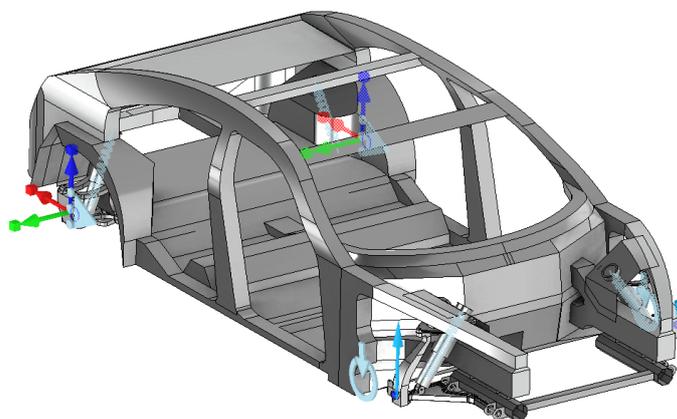


Figura 11. Condições de contorno para rigidez à torção de chassi

O resultado obtido inicialmente para a tensão máxima do chassi pode ser observado na Fig. 12 e responde aos critérios para averiguação da rigidez à torção. Desta forma, obtêm-se as deformações verticais máximas no chassi (Fig. 13) para utilização no cálculo da rigidez.

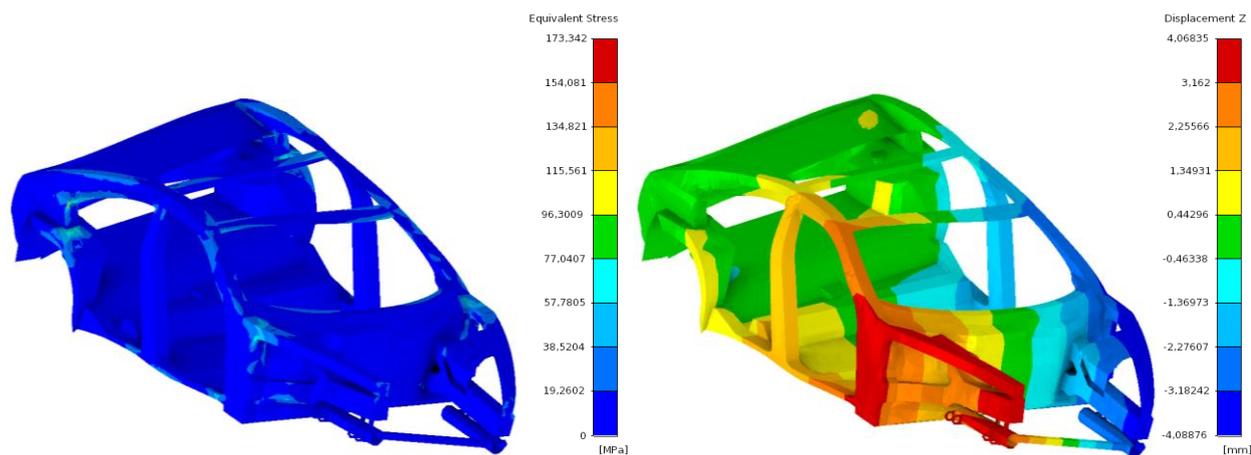


Figura 13. Deformação na direção do vertical

Com os dados de deformação do chassi original, chegou-se a uma rigidez à torção de $3,86 \text{ kN}\cdot\text{m}^\circ$. Conforme Happian-Smith (2002) um típico sedan médio tem sua rigidez à torção na faixa de 8 a $10 \text{ kN}\cdot\text{m}^\circ$, o que coloca o modelo desenvolvido em uma condição indesejável no qual é proposta a adição de mais elementos, como as portas e os vidros, que elevem a rigidez do chassi para uma faixa satisfatória.

6. CONCLUSÃO

As condições as quais o veículo é submetido em funcionamento são exploradas pelos engenheiros em prol do desenvolvimento de veículos seguros e previsíveis em seu comportamento dinâmico e estático. A torção de certa forma é um dos carregamentos mais perigosos que provoca falhas por cisalhamento na estrutura, o veículo deve estar apto a suportar a cargas sujeitas em uso.

O estudo satisfatoriamente desenvolveu o comparativo de modelagem numérica computacional com cálculo analítico baseado em resistência dos materiais. Pôde-se observar a divergência entre as metodologias e quais as limitações que norteava a modelagem do chassi original. Embora, o modelo em elementos finitos esteja apto a descrever várias condições e se adequar a qualquer geometria bem definida conforme os elementos de malha, há ainda uma divergência com a realidade e a análise de convergência também proposta, ajusta a resposta da simulação para resultados toleráveis.

É imprescindível o comparativo experimental que não pôde ser realizado neste trabalho. O enriquecimento de informações de ensaio de torção em chassi pode fornecer uma avaliação concreta que discute as respostas e o custo das operações de levantamento da rigidez analiticamente, por simulação computacional ou por aparato experimental.

7. REFERÊNCIAS

- Pedersen, B., 2018. *Conceptual dynamic - Analysis of a vehicle body*.
Genta, G., Morello, L., 2009. *The Automotive Chassis: Component Design*. Vol. 1.
Jalopnik, 2019. *An Extremely Detailed Look At The Porsche Taycan's Engineering Designed To Take On Tesla*. Acesso em: 07 de outubro de 2020 <<https://jalopnik.com/an-extremely-detailed-look-at-the-porsche-taycans-engineering-1837802533>>.
Happian-Smith, J., 2002. *An Introduction to Modern Vehicle Design*.
Megson, T. H. G., 2019. *Structural and Stress Analysis*. Butterworth-Heinemann. 4 ed.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.