

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**Melhoria de desempenho de chassi tipo Fórmula
Monoposto para Track Day**

**Autor: Lucas Silva Rodrigues Galvão
Orientador: Alessandro Borges Sousa Oliveira
Coorientador: Saleh Barbosa Khalil**

**Brasília, DF
2018**



Lucas Silva Rodrigues Galvão

Melhoria de desempenho de chassi tipo Fórmula Monoposto para Track

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Alessandro Borges Souza
Oliveira D.Sc

Co-Orientador: Saleh Barbosa Khalil

**Brasília, DF
2018**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Galvão, Lucas Silva Rodrigues.

Melhoria de desempenho de chassi tipo Fórmula
Monoposto para Track Day / Lucas Silva Rodrigues
Galvão. Brasília: UnB, 2018. 169 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Bacharel em Engenharia Automotiva) –
Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Brasília, 2018. Orientação: Alessandro
Borges Souza Oliveira.

1. Chassis. 2. Análise de rigidez. 3. Análise torcional I. Oliveira,
Alessandro Borges Souza. II Melhoria de desempenho de
chassi tipo Fórmula Monoposto para Track Day.

CDU Classificação

**Melhoria de desempenho de chassi tipo Fórmula Monoposto para Track Day
Lucas Silva Rodrigues Galvão**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 22/11/18) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. D.Sc: Alessandro Borges S. Oliveira, UnB/ FGA
Orientador

Prof. M. St: Saleh Barbosa Khalil, UnB/ FGA
Coorientador

Prof. Dr: Felipe Chagas Storti, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. D.Sc: Henrique Gomes de Moura, UnB/ FGA
Membro Orientador

Brasília, DF
2018

RESUMO

A função majoritária de qualquer chassi automotivo é unir os demais componentes do veículo interligando as partes como um suporte, tornando possível que todos os subsistemas trabalhem em conjunto. A qualidade de um chassi, especialmente de veículos de cunho esportivo, está diretamente ligada, à análise de rigidez torcional longitudinal de sua estrutura. Esse parâmetro na dinâmica veicular é um dos mais importantes para um chassi automotivo. Um chassi bem rígido permite, por exemplo, que os sub conjuntos da suspensão e da direção do veículo possam trabalhar livremente sem associar a eles as variações oriundas da deformação da estrutura. Um chassi basicamente sofre três tipos de deformação: torção longitudinal, flexão vertical e flexão lateral. Na realidade o chassi experimenta a combinação dos três tipos de deformação, a mais conhecida é a flexo-torção. Como forma de compreender o modo como as ferramentas virtuais de análise e desenvolvimento podem auxiliar na obtenção e na melhoria da qualidade torcional da rigidez de um chassi automotivo, este trabalho foi desenvolvido tendo como objeto de estudo o chassi de um veículo protótipo do tipo Fórmula monoposto a ser usado em eventos de Track Day. O trabalho consiste na aplicação sobre a estrutura do veículo objeto de estudo as análises: estática, flexo-torção, modal e de deflexão para cálculo de sua rigidez torcional em âmbito virtual. Como forma de validar o método virtual de obtenção da rigidez torcional, uma bancada de rigidez para teste físico foi utilizada, bem como o desenvolvimento de versões reforçadas do chassi original para melhor compreensão dos resultados encontrados. A aplicação de barras e elementos de travamento podem conferir, se bem localizados, a uma estrutura como um chassi automotivo, uma melhor qualidade no que se refere a rigidez torcional e resistência.

Palavras-chave: Chassi, Estrutura, Rigidez, Análise, Torção, Flexão, Modal, Fórmula Monoposto.

ABSTRACT

The major function of any automotive chassis is to join the other components of the vehicle interconnecting the parts as a support, making it possible for all subsystems to work together. The quality of a chassis, especially of sports vehicles, is directly linked to the longitudinal torsional stiffness analysis of its structure. This parameter in vehicle dynamics is one of the most important for an automotive chassis. A very rigid chassis allows, for example, that the subassemblies of the suspension and the steering of the vehicle can work freely without associating to them the variations arising from the deformation of the structure. A chassis basically suffers three types of deformation: longitudinal torsion, vertical flexion and lateral flexion. In fact, the chassis experiences the combination of the three types of deformation, the best known is flexo-torsion. As a way of understanding how virtual analysis and development tools can help to obtain and improve the torsional quality of the rigidity of an automotive chassis, this work was developed with the purpose of studying the chassis of a prototype vehicle of the single-seat Formula type to be used in Track Day events. The work consists in applying the static, flexo-torsion, modal and deflection analysis to the calculation of its torsional stiffness in a virtual environment. As a way of validating the virtual method of obtaining torsional stiffness, a stiffness bench for physical testing was used, as well as the development of reinforced versions of the original chassis to better understand the results found. The application of bars and locking elements can confer, if well located, a structure such as an automotive chassis, a better quality with regard to torsional stiffness and strength.

Keywords: Chassis, Structure, Rigidity, Analysis, Torsion, Flexion, Modal, Monoposto Formula.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
SUMÁRIO	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 VISÃO GERAL <i>TRACK DAY</i>	2
1.2 VEÍCULO OBJETO DE ESTUDO	4
1.3 OBJETIVO GERAL.....	5
1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.4 METODOLOGIA.....	7
1.5 DIVISÃO DE TRABALHO.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - CHASSI FÓRMULA MONOPOSTO	11
2.1 TIPOS DE CHASSI - FÓRMULA MONOPOSTO	11
2.1.1 CHASSI <i>SPACE FRAME</i>	11
2.1.2 CHASSI <i>MONOCOQUE</i>	13
2.1.3 CHASSI <i>MONOCOQUE HÍBRIDO</i>	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI.....	16
3.1 TIPOS DE DEFORMAÇÃO DE CHASSI.....	16
3.1.1 TORÇÃO LONGITUDINAL	16
3.1.2 FLEXÃO VERTICAL	17
3.1.3 FLEXÃO LATERAL.....	18
4 PROPRIEDADES DE CHASSI	19
4.1 PARÂMETROS ESTRUTURAIS E DINÂMICOS	19
4.1.1 PROPRIEDADES INERCIAIS.....	19
4.1.2 PROPRIEDADES DE RIGIDEZ	20
4.2 RIGIDEZ X RESISTENCIA	21
4.3 RIGIDEZ TORCIONAL	21
5 DADOS DO VEÍCULO OBJETO DE ESTUDO	26
5.1 MATERIAL CONSTITUINTE DO CHASSI	26
5.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA AISI SAE 1020	27
5.2 GEOMETRIA DO VEÍCULO	28
5.2.1 MODELAGEM 3D DO CHASSI	31
5.2.2 MASSA DO VEÍCULO	33
5.2.3 CÁLCULO DA POSIÇÃO DO CENTRO DE MASSA	34
5.2.3.1 POSIÇÃO GLOBAL DO CG DO VEICULO	37
6 ESFORÇOS DINÂMICOS	39
6.1 PACOTE COMERCIAL <i>SOFTWARE CARSIM</i>	39
6.2 ANÁLISE DO <i>SOFTWARE CARSIM</i> PARA O VEÍCULO OBJETO DE ESTUDO	39
6.2.1 TESTE DE VARREDURA SENOIDAL DE INCLINAÇÃO DE TRAVESSIA (CROSS SLOPE SINE SWEEP TEST).....	41
6.3 RESULTADOS DAS FORÇAS DINÂMICAS INTERAÇÃO PNEU/SOLO	43
7 ANÁLISES ESTRUTURAIS DO MODELO 3D.....	49
7.1 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	49
7.2 PROCEDIMENTO DAS ETAPAS DO <i>ANSYS WORKBENCH</i>	50
7.3 ANÁLISE CHASSI <i>ANSYS WORKBENCH</i>	51
7.3.1 ANÁLISE ESTÁTICA.....	52

7.3.1.1	RESULTADOS ANÁLISE ESTATICA.....	54
7.3.1.1.1	DISCUSSAO DOS RESULTADOS DA ANALISE ESTATICA	58
7.3.2	ANALISE DE FLEXO-TORÇÃO.....	58
7.3.2.1	RESULTADOS ANÁLISE DE FLEXO-TORÇÃO.....	61
7.3.2.1.1	DISCUSSAO DOS RESULTADOS DA ANALISE DE FLEXO TORÇÃO	66
7.3.3	MODOS DE VIBRAÇÃO.....	67
7.3.3.1	FAIXA DE FREQUENCIA DE EXITAÇÃO.....	67
7.3.3.2	ANALISE DOS MODOS DE VIBRAÇÃO LIVRE DO CHASSI.....	68
7.3.3.2.1	RESULTADOS ANALISE DOS MODOS DE VIBRAÇÃO LIVRE.....	69
7.3.3.2.1.1	DISCUSSAO DOS RESULTADOS DA ANALISE DOS MODOS DE VIBRAÇÃO.....	73
8	ANÁLISE DA RIGIDEZ DO CHASSI VIA SOFTWARE.....	75
8.1	ANALISE DE DEFLEXÃO PARA CÁLCULO DA RIGIDEZ DE CHASSI.....	75
8.1.1	RESULTADOS DA ANALISE	76
8.2	VALOR CALCULACO DA RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI.....	77
9	ANÁLISE DA RIGIDEZ DO CHASSI VIA TESTE FÍSICO (BANCADA).....	79
9.1	MÉTODOLOGIA.....	79
9.2	ESFORÇOS CONSIDERADOS PARA A ANÁLISE.....	82
9.3	MEDIÇÃO.....	84
9.4	MODELO DE BANCADA EXPERIMENTAL PROPOSTO.....	86
9.5	RESULTADOS DA ANÁLISE FÍSICA DA RIGIDEZ TORCIONAL.....	91
9.5.1	CÁLCULO DA RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI VIA TESTE FÍSICO.....	97
10	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE RIGIDEZ TORCIONAL.....	98
11	MOLDELOS PROPOSTOS PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DO CHASSI.....	100
11.1	DESEMPENHO DA PRIMEIRA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO.....	102
11.2	DESEMPENHO DA SEGUNDA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO.....	106
11.3	DESEMPENHO DA TERCEIRA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO.....	109
11.4	DESEMPENHO DA QUARTA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO... ..	112
11.5	DESEMPENHO DA QUINTA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO.....	115
12	ANÁLISE DO CHASSI ORIGINAL TODO FEITO POR BARRAS TUBULARES.....	119
12.1.	DESEMPENHO DO CHASSI ORIGINAL INTEGRALMENTE TUBULAR.....	119
13	PROPOSTA FINAL DE CHASSI TUBULAR DE MAIOR RENDIMENTO.....	123
14	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	127
15	CONCLUSÃO	129
16	TRABALHOS FUTUROS	131
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
	ANEXOS	134

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o site da Federação Internacional de Automobilismo (FIA), os veículos monopostos do tipo Fórmula surgiram em meados da década de 1950. Nessa mesma década, mais precisamente no dia 13 de maio de 1950, a categoria máster do automobilismo, Fórmula 1, fora inaugurada na Inglaterra no Circuito de Silverstone.

Esse tipo de veículo, é caracterizado pelo seu assento único, tendo suas rodas dispostas fora do corpo principal do veículo. De modo geral possui o habitáculo do condutor projetado de forma a possuir a menor largura possível, reduzindo, assim, a sua área frontal, favorecendo a aerodinâmica.

Assim como qualquer veículo, os esforços suportados pela estrutura (chassi) de um Fórmula Monoposto são oriundos de variadas fontes de excitação. Esse tipo de veículo requer uma estrutura bastante rígida, na qual possa suportar adequadamente todos os esforços a ele impostos no decorrer da prova, seja por fator de segurança ou mesmo para permitir aos subsistemas de suspensão e direção uma melhor condição de trabalho.

Esses esforços englobam desde solicitações de perfil de pista a transferências dinâmicas, decorrente da aceleração lateral e longitudinal, ou até mesmo a transposição de obstáculos.

A estrutura dos chassis dos veículos monopostos sofreram mudanças drásticas com o decorrer da evolução das técnicas de fabricação, materiais e o próprio entendimento da ciência aerodinâmica. Os veículos passaram a ser mais rígidos, esguios e baixos. O incremento de materiais nobres ou mesmo inteligentes, como é o caso dos compósitos de carbono e fibra de aramida, possibilitou melhorias no desempenho das estruturas desses veículos.

A qualidade da rigidez torcional da estrutura de um chassi, reflete no comportamento do veículo como um todo. Atualmente há vários *softwares* que auxiliam na observação do quanto um chassi atende a especificações em termos de

resistência de material, bem como aos modos de vibração da estrutura sujeita a excitações diversas de acordo com o uso destinado.

Há várias formas de mensurar a rigidez torcional de uma estrutura como um chassi automotivo, sem dúvida alguma as análises físicas, realizadas em bancadas de teste especialmente para esse fim, são as mais indicadas por considerarem todos os fatores reais.

1.1. VISÃO GERAL *TRACK DAY*

Como forma de contextualizar o cenário de utilização do veículo estudado, esta seção aborda um pouco da história da modalidade *Track Day* e de seu funcionamento.

Até certo tempo, a oportunidade de pilotar um veículo motorizado em uma pista de automobilismo profissional (Autódromo), estava destinado a pilotos profissionais patrocinados. Hoje isso mudou, aspirantes, amadores e pilotos do automobilismo têm essa oportunidade e a cada ano torna se mais facilitada a realização do feito. O incremento de tecnologias que visam maior rendimento, quer seja em aceleração plena, frenagem ou curva, instiga mais adeptos à modalidade do *Track Day*.

Segundo o periódico Revista *Track Day* de março de 2014, a modalidade teve início em 1978, na Inglaterra em uma escola de pilotagem que ensinava os alunos as técnicas de condução em seus próprios veículos. No término do curso, que durava uma semana, a pista era aberta para que os alunos colocassem em prática o que aprenderam na teoria.

O periódico também classifica a modalidade como um evento organizado, no qual propicia ao motorista comum a oportunidade de ter a experiência de conduzir seu carro de dia ou mesmo alugado, a sensação de pilotar de maneira a render o máximo do veículo em um circuito fechado, com toda segurança que a estrutura de um autódromo disponibiliza.

O Track Day também tem o viés de retirar condutores que outrora poderiam promover e disputar corridas e rachas em vias públicas. Em troca disso, utilizam uma estrutura fechada e projetada, para se obter o máximo rendimento do veículo de forma responsável, sem associar o alto valor das categorias do automobilismo profissional. Além disso, o Track Day possibilita o desenvolvimento de carros preparados, a melhora das habilidades e o reflexo dos condutores ao volante, e até mesmo auxilia nos treinos de pilotos profissionais.

No Brasil, de acordo com a CBA (Confederação Brasileira de Automobilismo), o Track Day teve início no ano de 1997, no Autódromo de Jacarépaguá no estado do Rio de Janeiro. Naquela época, a FAERJ (Federação de Automobilismo do Estado do Rio de Janeiro), liberava alguns carros para andarem nos intervalos das provas regionais. De lá para cá, tornou se mais comum a participação dos brasileiros na prática do Track Day. Mesmo sem o apoio direto dos governos regionais, os eventos a cada ano crescem mediante a paixão regada a resiliência dos organizadores e participantes das etapas da modalidade.

Geralmente o evento ocorre nos finais de semana, sábado e domingo, começando pela manhã, indo até o final da tarde. A organização do evento exige um nível alto de organização, para garantir o máximo proveito sem abrir mão da segurança de quem pilota os veículos ou assiste aos eventos. A presença de carros de apoio, ambulância, guincho e equipe de bandeirinhas asseguram a qualidade do serviço prestado.

Diferentemente das demais modalidades do automobilismo, o *Track Day* não tem um fim competitivo. A disputa é interna, cada piloto briga consigo mesmo para obter o menor tempo de volta possível. A ideia é o aprimoramento pessoal no conhecimento de pista e do equipamento utilizado. O melhor ponto para acelerar, a menor distância de frenagem na aproximação à curva, o melhor traçado da pista são algumas das metas desejadas por aqueles que participam das etapas.

É muito comum pessoas que participam regularmente do *Track Day* terem veículos preparados de uso exclusivo para a atividade. As alterações partem de um simples alívio de peso, como a subtração dos bancos traseiros, a alterações

de nível mais específicos como a troca do motor, substituindo o por outro de maior rendimento. Algumas dessas pessoas investem no veículo quantidade que ultrapassam o valor do bem em si.

1.2. VEÍCULO OBJETO DE ESTUDO

O veículo objeto de estudo utilizado neste trabalho, representado pela figura 1, é um protótipo do tipo Fórmula Monoposto, desenhado e construído pelo ex-piloto da categoria Stock Car V8 Ligth do Brasil, Sandro Ferrari. Sandro correu pela P&B BRB Racing no ano de 2005 e hoje, além de empresário do ramo automotivo é piloto da categoria Centro Oeste de Marcas e Pilotos. Ao final do trabalho no anexo 1 há mais fotos do veículo modelo estudo.



Figura 1 – Ilustração protótipo Fórmula monoposto

Na carreira automobilística profissional de monopostos, a primeira categoria a participar é a do Kart, sendo que a próxima na cadeia evolutiva é a categoria Fórmula 3. Sandro observou que há muitos jovens pilotos que se sobressaem no Kart, e que poderiam se desenvolver bem no cenário do automobilismo. Contudo, se deparam com a dificuldade de se manter ativos na Fórmula 3, principalmente por conta do alto custo operacional a ela submetida, e inviabilizando, assim, muitas vezes a continuidade da carreira no automobilismo profissional.

A proposta de Sandro Ferrari foi desenvolver uma categoria intermediária, entre o Kart e a Fórmula 3, chamada inicialmente de fórmula Ideal, onde tinha o objetivo de dar acesso a novos pilotos no cenário automobilístico profissional nacional, principalmente na Região Centro-Oeste, permitindo, assim, a evolução da carreira aos aspirantes, sem associar o alto custo operacional que a fórmula 3 possui. Ele chegou

a construir dois veículos totalmente funcionais. Contudo, o custo de homologar a categoria na CBA, bem como a quantidade mínima de veículos exigida para a homologação da categoria, era muito alto e, portanto o projeto fora cancelado.

Certa ocasião, tive a oportunidade de adquirir um desses veículos para a realização desta pesquisa e posteriormente transforma-lo num projeto pessoal. O Fórmula fora adquirido completo. As características técnicas do veículo estudado se assemelham aos da categoria fórmula 3. Além de ser monoposto, suas rodas são desprovidas de cobertura e utilizam todo o arranjo aerodinâmico também encontrado na categoria.

Sua estrutura é constituída por perfis retangulares e tubulares de liga de aço, soldados de maneira que travam os movimentos de torção e flexão de sua estrutura. A suspensão é do tipo Double *Wishbone* (dupla A) na dianteira e *Trailing arm* (braço de arrasto) com links (tirantes) na traseira.

1.3. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é compreender a maneira como as ferramentas virtuais de análise e desenvolvimento podem auxiliar numa melhor configuração em termos de rigidez torcional (K_t) da estrutura, em prol do aprimoramento da performance do conjunto estrutural de um chassi de veículo tipo Fórmula Monoposto.

Inicialmente será quantificada o valor da rigidez torcional da estrutura do veículo estudado usando formulação a ser apresentada com dados fornecidos pela análise de deflexão do chassi em âmbito virtual através da utilização do software dos Métodos dos Elementos Finitos Ansys 17.0. Posteriormente como forma de validar o valor de rigidez torcional encontrado pelos dados virtuais, será considerada uma análise real em bancada física para a análise de rigidez da estrutura.

Uma vez validado o modelo dos Métodos dos Elementos Finitos utilizado, será modificada virtualmente a estrutura original observando os resultados das análises estruturais em âmbito: estático, dinâmico e dos modos de vibração, possibilitando uma melhor compreensão da utilização dos recursos dos pacotes comerciais como: *CATIA*

V5, *CARSIM 8.1* e *ANSYS 17.0*, para a melhora da performance em termos de rigidez e resistência da estrutura do modelo em análise.

1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O primeiro objetivo específico é a modelagem 3D do chassi do veículo objeto de estudo para realização das análises estruturais que são expostas nos objetivos específicos subsequentes de maneira a tornar conhecida a qualidade estrutural do mesmo;

No segundo será considerado o levantamento do comportamento estático do chassi, a saber sua distribuição de peso sobre os seixos de suporte e o ponto onde se localiza o centro de massa do veículo.

O terceiro objetivo específico é a consideração do carregamento dinâmico a ser submetida ao modelo 3D, simulando uma condição mais real que exija do chassi em termos de rigidez e resistência;

No quarto através dos dados encontrados no segundo objetivo específico: distribuição da massa e posição do centro de massa, será realizada a análise do comportamento do chassi do modelo de estudo considerando esforços estáticos.

O quinto objetivo específico considera a análise do comportamento do chassi submetido a esforços dinâmicos oriundos do terceiro objetivo específico listado, realizado sob a condição de flexo-torção do chassi.

O sexto é realizada a análise modal a saber os modos de excitação natural e suas respectivas frequências;

O sétimo objetivo específico considera a análise da rigidez torcional (K_t) do chassi em âmbito virtual;

O oitavo tem a função de validar a análise virtual realizada, comparando a ao resultado obtido pelo uso de uma bancada física projetada para testar a rigidez torcional de estruturas;

O nono objetivo específico é o aprimoramento da rigidez do chassi, através da aplicação de barras de travamento e pela mudança da geometria da estrutura do chassi na intenção de tornar a estrutura atendente aos requisitos impostos a ela.

1.4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada partiu da busca dos fundamentos teóricos e da formulação matemática a serem utilizadas ao modelo 3D, bem como da estrutura real do chassi do veículo estudado, conhecendo informações referente a resistência de seu material constituinte, especificamente o limite de escoamento.

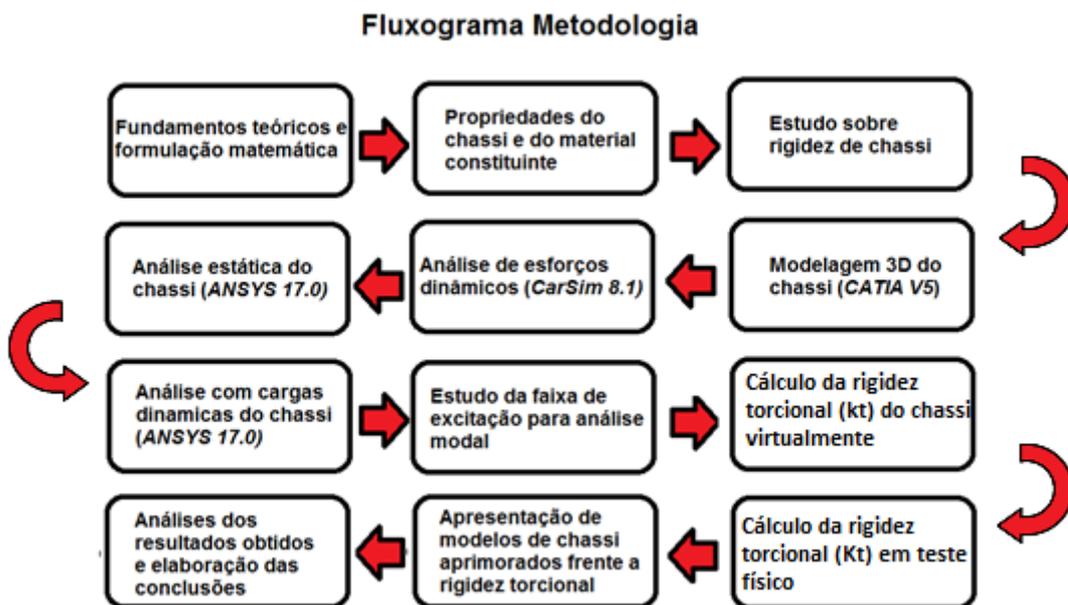
O estudo acerca da rigidez de chassi é necessário para a aplicação das análises estruturais propostas, mediante o conhecimento dos esforços em âmbito estático, onde se considera apenas o peso estático do veículo totalmente montado, a esforços dinâmicos. Para os esforços dinâmicos, foi considerado uma condição onde o veículo hipoteticamente transpassa por um obstáculo do tipo zebra a promover o efeito da flexo-torção em sua estrutura através da utilização do programa de dinâmica veicular *CarSim*.

Uma vez levantado os esforços estáticos e dinâmicos, o modelo 3D fora concebido a ser submetido as análises estruturais. O estudo da faixa de frequência de excitação tem o objetivo de definir um intervalo de interesse na qual deseja que a estrutura em análise modal, não possua modos de excitação ou apenas frequências naturais dentro desse intervalo estipulado vibrando livremente.

Pela análise de deflexão do chassi, será quantificado o valor da rigidez torcional do modelo 3D considerado, a ser validado pela aplicação real da análise em bancada física projetada para o cálculo da rigidez torcional de estruturas. E feito isso promover as devidas melhoria da resistência e da rigidez torcional do chassi analisado por

intermédio da aplicação de diversas barras e elementos de travamento, a ser analisado.

A metodologia utilizada está demonstrada no fluxograma no Quadro 1 abaixo, ilustrando tudo que fora realizado.



Quadro 1- Ilustração fluxograma da metodologia utilizada

1.5. DIVISÃO DE TRABALHO

Este trabalho foi dividido da seguinte maneira:

No primeiro capítulo é exposto uma introdução sintetizando o conteúdo abordado por todo trabalho, bem como os objetivos e a metodologia utilizada para sua realização.

No segundo capítulo é desenvolvida a revisão acerca do chassi Fórmula Monoposto demonstrando as variações dos tipos de chassi existentes desse tipo de veículo: Chassi Tubular (*Space Frame*), Chassi Monocoque e Chassi Monocoque-Híbrido.

No terceiro capítulo é abordado uma breve revisão acerca da rigidez torcional de chassi, exibindo os principais tipos de deformação que um chassi pode sofrer: Torção Longitudinal, Flexão vertical e Flexão lateral.

No quarto capítulo são apresentadas as propriedades de chassi por parâmetros estruturais e dinâmicos, além de uma breve discussão dos termos rigidez e resistência. Nesse mesmo capítulo é exposta a formulação para o cálculo da rigidez torcional de chassi

No quinto capítulo são expostos os dados do veículo objeto de estudo em análise, considerando a modelagem 3D do chassi, informando o material constituinte, composição química, dados de geometria, distribuição da massa e cálculo da posição global do CG do veículo estudado.

No sexto capítulo são tratados os esforços de cunho dinâmico a serem consideradas na análise de flexo-torção da estrutura do chassi.

No sétimo capítulo, uma vez conhecidas as forças estáticas e dinâmicas anteriormente analisadas, e com o auxílio do *software de MEF, Ansys 17.0*, foram realizadas as análises estruturais: estática, de flexo-torção e dos modos de vibração da estrutura do chassi inicial.

No oitavo capítulo, através da formulação apresentada no capítulo quatro referente a rigidez torcional de chassi, foi encontrada a rigidez torcional da estrutura inicial do modelo em análise, utilizando o *software ANSYS 17.0*.

No nono capítulo, em posse do valor da rigidez torcional (K_t) encontrado virtualmente, é necessário como forma de validar o resultado encontrado ambiente virtual, a realização de um teste físico em bancada projetada para quantificar a rigidez torcional da estrutura.

No décimo capítulo será realizada uma comparação dos valores obtidos referentes a rigidez torcional do chassi analisado tanto virtualmente quanto fisicamente.

No décimo primeiro capítulo foram apresentadas variações da estrutura inicial do veículo estudado na intenção de melhorar a qualidade da rigidez torcional do chassi, visando a relação rigidez/peso. Para isso travamentos e mudança de geometria foram utilizados. Tais novas configurações serão submetidas aos mesmos testes estruturais utilizados no capítulo sete através do *Software ANSYS 17.0*, bem como a obtenção dos respectivos valores de rigidez torcional (K_t).

No décimo segundo capítulo, assim como o capítulo onze, serão realizados os mesmos testes evidenciados no capítulo sete contudo dessa vez com uma estrutura que segue o mesmo layout do chassi originalmente mas confeccionado integralmente por barras tubulares.

No décimo terceiro capítulo, igualmente aos capítulos onze e doze, será realizada na intenção de aumentar o conhecimento adquirido por realizar o trabalho análises seguindo as do capítulo sete numa estrutura tubular inteiramente nova como opção de um novo layout proposto ao chassi do veículo estudado.

No décimo quarto capítulo, são geradas as conclusões finais gerais que a execução do trabalho propiciou, levando em consideração tudo que fora desenvolvido em toda sua extensão. Levando em conta requisitos como custo/benefício e a relação rigidez/peso, salientando o impacto que cada alteração causou na melhora da qualidade do desempenho da rigidez estrutural da estrutura do chassi do Fórmula Monoposto estudado.

O décimo quinto capítulo aborda sugestões de trabalhos futuros em cima do Fórmula, como justificativa da melhoria da performance da rigidez de seu chassi, visando rendimento e segurança.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – CHASSI FÓRMULA MONOPOSTO

No livro a Ciência do Desenho do Fórmula 1 (The Science of Formula One Design) (Tremayne, 2004), é dito que a função majoritária de qualquer chassi é unir os demais componentes do veículo interligando as partes como um suporte, tornando possível que todos os subsistemas trabalhem em conjunto. Além de suporte, é função do chassi receber os esforços oriundos do sistema de suspensão de modo que o mesmo mantenha sua eficiência, garantindo a segurança dos ocupantes do veículo, bem como dispor de uma boa performance.

Para que as funções do chassi sejam bem desempenhadas, o mesmo deve ser capaz de suportar tanto carregamentos internos quanto carregamentos externos ao veículo. Carregamentos internos são aqueles originados por fontes embarcadas no veículo, como por exemplo o motor, e carregamentos externos podem ser exemplificados pelas forças aerodinâmicas ou forças de interação pneu-solo (Storto, 2011).

No âmbito de veículos de alto desempenho, especialmente os do tipo Fórmula Monoposto, o chassi deve ser extremamente rígido e robusto (Tremayne, 2004), uma estrutura pouco rígida compromete as fixações de seus componentes e prejudica o processo de ajuste do veículo (Storto, 2011). Com isso, os parâmetros para um chassi de um veículo de alto desempenho são: alta rigidez torcional e a baixa flexão vertical e lateral, associado a um baixo peso (Eurenius, Danielsson, Khokar, Krane, Olofsson, & Wass, 2013).

2.1. TIPOS DE CHASSI - FÓRMULA MONOPOSTO

De acordo com a longo da linha evolutiva das técnicas de fabricação e de materiais nas construções de chassi automotivo, basicamente existem três tipos de chassi mais utilizados em Fórmulas Monopostos: *Space Frame*, *Monocoque* e *Monocoque Híbrido*.

2.1.1. CHASSI SPACE FRAME

Um chassi tipo Space Frame (chassi tubular), como mostrado na figura 2, é uma estrutura rígida constituída pela utilização de tubos e perfis, que unidos formam

um padrão geométrico. Essa disposição física forma uma estrutura base que permite a conexão dos demais componentes necessários ao veículo.



Figura 2 - Chassi Spaceframe

Sua fabricação se mostra bastante simples, baseada na soldagem de tubos e perfis de acordo com o projeto vigente. Naturalmente, todas as solicitações de cargas são absorvidas pelo chassi tubular. Desse modo a carroceria do veículo não tem função estrutural, apenas aerodinâmica e de proteção.

Os materiais mais utilizados em chassis do tipo *Space Frame* é a família das ligas de aço, por possuírem uma combinação de boa rigidez, facilidade de construção e baixo custo (Eurenius, Danielsson, Khokar, Krane, Olofsson, & Wass, 2013).

Como pontos positivos, o chassi tipo *Space Frame*, apresenta:

- Processo de fabricação simples;
- Ferramental acessível;
- Versatilidade na escolha de equipamentos, materiais e carrocerias;
- Facilidade de serem modificados.

Todavia, esse chassi possui baixa relação de rigidez/peso. Em outras palavras, para que se possa usufruir de uma estrutura bastante rígida, é necessário o incremento de diversos travamentos que implicam no aumento de massa ao chassi, tornando-o, assim, demasiadamente pesado.

2.1.2. CHASSI MONOCOQUE

O chassi tipo monocoque, como mostrado na figura 3, é o modelo a ser implementado quando se busca uma performance de chassi de alto nível. Tanto é verdade, que, dos três tipos de chassi de Fórmula Monoposto destacados nesta seção 2.2 deste trabalho é o único tipo atualmente usado na categoria Formula 1.



Figura 3 - Chassi Monocoque.

O chassi Monocoque é geralmente formado por uma única peça. A técnica usada no chassi monocoque, consiste numa construção que permite o suporte do carregamento sobre a superfície do material constituinte do chassi. O uso de materiais compósitos permite que força, rigidez e flexibilidade possam ser controladas em diferentes direções, aumentando assim sua relação rigidez/peso, o que possibilita a fabricação de chassis extremamente leves (Eurenius, Danielsson, Khokar, Krane, Olofsson, & Wass, 2013).

Como pontos positivos, o *Chassi Monocoque* apresenta:

- Melhor comportamento dinâmico;
- Alta rigidez;
- Baixo peso.

Contudo, o chassi do tipo *Monocoque* apresenta elevado custo de fabricação, pois exige matéria prima e maquinário caros, e há necessidade de mão de obra qualificada.

2.1.3. CHASSI MONOCOQUE HÍBRIDO

O chassi do tipo *Monocoque Híbrido*, ilustrado na figura 4, pode ser entendido como a união dos dois tipos de chassis anteriormente mencionados, chassi *Space Frame* e o chassi *Monocoque*. Geralmente na parte frontal dos chassis que fazem uso dessa combinação dessa estrutural é utilizada uma unidade, seguindo o padrão *Monocoque*, composta pela unidade principal como a célula de segurança. Na parte traseira do chassi encontra-se uma estrutura metálica no estilo do chassi *Space Frame*, em que são conectadas o conjunto powertrain (motor e câmbio) e a suspensão traseira.



Figura 4 - Chassi Monocoque Híbrido.

Como pontos positivos o Chassi *Monocoque Híbrido* apresenta:

- Alta rigidez;
- Baixo peso;
- Boa versatilidade;
- Facilidade de montagem e ajustes.

Porém, uma dificuldade encontrada nesse tipo de chassi é alcançar uma boa integração entre as partes anterior e posterior, de modo a prever com exatidão os carregamentos nessa união (Eurenius, Danielsson, Khokar, Krane, Olofsson, & Wass, 2013).

O tipo de chassi do veículo objeto de estudo é do tipo *Chassi Space Frame*, conforme é possível observar na figura 5 abaixo.



Figura 5 – Chassi do veículo objeto de estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – RIGIDEZ TORCIONAL DE CHASSI

Além de possuir o mais baixo peso possível, um chassi de alto desempenho necessita que tenha um valor de rigidez muito superior se comparado ao do subsistema suspensão, (Canut, 2014). Contudo, na prática a união de baixo peso à alta rigidez nem sempre é de fácil, principalmente pelo fator custo. Em linhas gerais um chassi muito rígido ou é muito pesado ou é bastante caro.

Um dos principais deveres de um engenheiro automotivo é avaliar as condições postas, em prol de se obter um bom valor de rigidez torcional de chassi, associando a ele um baixo peso estrutural, o suficiente para permitir um bom desempenho do veículo.

Em razão disso, faz-se necessário conhecer e avaliar não apenas as forças a que um chassi é submetido, mas também as deformações que a estrutura irá sofrer decorrentes dos carregamentos.

3.1. TIPOS DE DEFORMAÇÃO DE CHASSI

De modo geral, os principais tipos de deformações em um chassi podem ser entendidos em 3 categorias (Riley & George, 2002):

- *Torção Longitudinal*
- *Flexão Vertical*
- *Flexão lateral*

3.1.1. Torção Longitudinal

A torção longitudinal é resultante da aplicação de diferentes esforços nos pontos de apoio do veículo com o solo, de maneira a promover a torção do chassi. Tal condição é experimentada em trajetos curvilíneos, pela transposição de irregularidades ou mesmo por obstáculos na pista. Desse modo, considera-se que o chassi é uma espécie de mola torcional que atua entre os eixos dianteiro e traseiro.

A deformação da estrutura do chassi sob torção interfere na performance da suspensão. Em função disso, afeta a dirigibilidade, bem como a performance do veículo (Riley & George, 2002). A figura 6, de forma simplificada, ilustra tal comportamento:

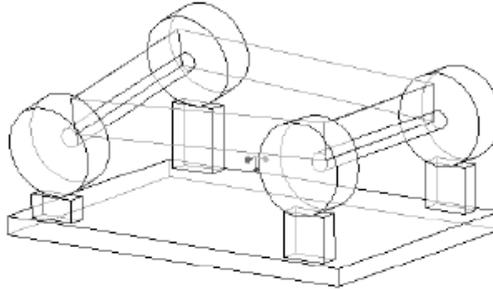


Figura 6 - Deformação por torção longitudinal. (Riley & George, 2002)

A torção longitudinal é considerada como sendo o principal fator para determinação da qualidade da performance estrutural de um chassi de alto desempenho. Ela é definida pela transferência de peso lateral em curvas (Riley & George, 2002).

Considerando um chassi extremamente rígido, as respostas decorrentes das excitações de pista dar-se-ão em função apenas das deformações oriundas do trabalho do sistema de suspensão do veículo (Riley & George, 2002).

3.1.2. Flexão Vertical

Em função de carregamentos internos, como piloto e demais componentes do veículo distribuídos pelo chassi, é promovido o efeito da flexão vertical do veículo. Nos pontos de apoio do veículo ao solo (pneus), estão as reações a tais carregamentos.

As forças de reação se concentram nos eixos, e a magnitude dessas forças pode aumentar ou diminuir de acordo com acelerações verticais (Riley & George, 2002). A figura 7, demonstra o efeito da flexão vertical de chassi:

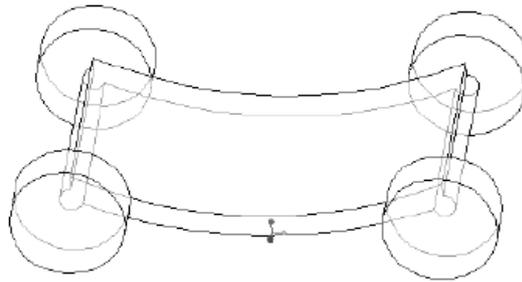


Figura 7 - Deformação por flexão vertical. (Riley & George, 2002)

3.1.3. Flexão Lateral

O efeito da flexão lateral tem como origem física as excitações das acelerações laterais experimentadas em curvas através da força centrífuga. Dessa forma, os apoios da estrutura ao solo suportam o movimento lateral, uma vez que tais forças atuam em toda extensão do chassi, promovendo a sua flexão lateral (Riley & George, 2002). A figura 8, ilustra a flexão lateral:

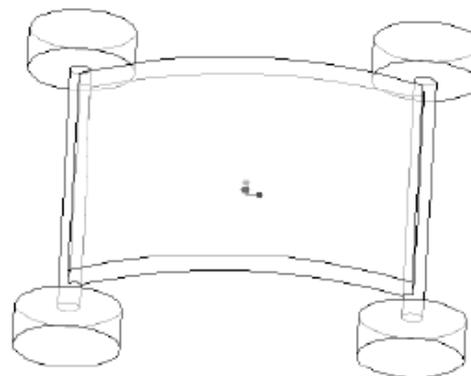


Figura 8 - Deformação por flexão lateral. (Riley & George, 2002).

A estrutura de um veículo, na realidade pode experimentar uma combinação das três deformações citadas, a mais conhecida é a flexo-torção do chassi. A flexo-torção é comumente considerada uma das situações onde se exige mais do conjunto estrutural de um chassi automotivo (Riley & George, 2002).

4. PROPRIEDADES DE CHASSI

Pelo fato de o chassi exercer múltiplas funções, suas propriedades devem ser definidas levando-se em consideração aspectos que, na prática, podem não estar em concordância uns com os outros. Aspectos como dinâmica veicular, segurança, aerodinâmica, compactação e custo são requisitos que influenciam o produto final, especialmente em sua performance.

4.1. PARÂMETROS ESTRUTURAIS E DINÂMICOS

Do ponto de vista estrutural e dinâmico, propriedades inerciais e de rigidez são consideradas importantes no projeto ou na análise de uma estrutura como a de um chassi veicular.

4.1.1. PROPRIEDADES INERCIAIS

Nas propriedades inerciais de um chassi a massa e sua respectiva distribuição são parâmetros relevantes a um veículo de alto desempenho. Por mais que estes parâmetros existam em cada componente constituinte do veículo, devido a função de integração entre as partes, o chassi tem grande importância para a definição das propriedades inerciais do veículo como um todo.

Além das propriedades de massa e de sua respectiva distribuição, o momento de inércia, especificamente o momento de inércia de guinada do chassi (*yaw*), é bastante influente em um veículo como o do objeto de estudo deste trabalho. Em veículos como o em análise é preferível altos valores de momento de inércia *yaw* (MILIKEN, 1995). Abaixo, a figura 9, ilustra os momentos de inércia submetidos a uma estrutura:

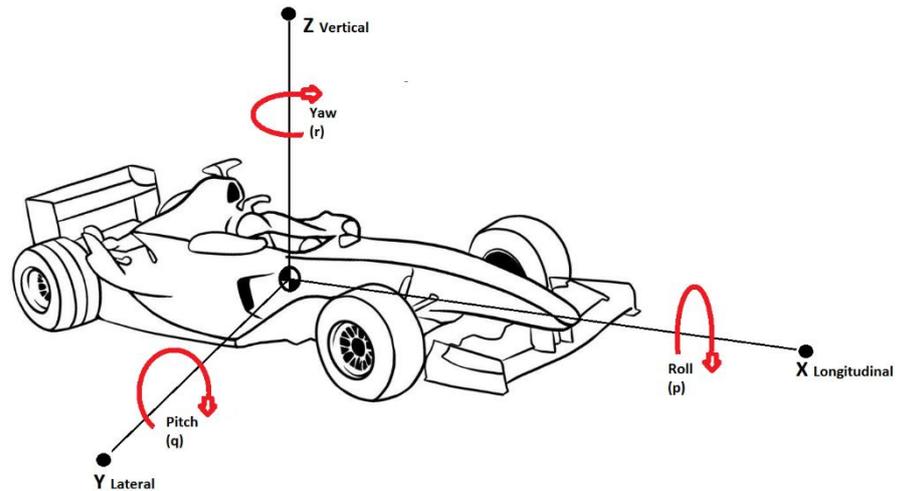


Figura 9 - Momentos de inércia submetidos a uma estrutura.

4.1.2. PROPRIEDADE DE RIGIDEZ

Rigidez de chassi, frente as excitações de pista, envolve tanto o comportamento dinâmico quanto a maneira como a estrutura irá vibrar. É desejável um chassi rígido o suficiente para absorção das cargas externas favorecendo o bom funcionamento do veículo.

Tomando os modos de deformação citados na seção 3.1 especificamente a torção longitudinal e a flexão vertical, como as principais na análise da performance estrutural de um chassi, é possível definir valores estáticos para a rigidez a cada uma delas.

Desse modo, a rigidez referente à flexão vertical é a deformação simétrica vertical de um ponto nas aproximações do centro do veículo quando aplicado cargas estáticas.

A torção longitudinal, em rigidez, se caracteriza pela deformação angular da estrutura, aplicando sobre ela um binário puro ao longo de seu eixo longitudinal.

A rigidez à torção representa o principal critério para o projeto e desenvolvimento de um chassi, além de ser o fator determinante para a sua alta performance (MILIKEN, 1995).

4.2. RIGIDEZ X RESISTÊNCIA

Como já dito, características como manobrabilidade e dirigibilidade estão intimamente relacionadas à rigidez da estrutura do veículo, sendo, assim, um importante parâmetro a ser estabelecido (Thompson, 1998; Happian, 2002).

Rigidez de um chassi tem como principal característica os deslocamentos e deformações sofridos pela estrutura, quando a mesma for submetida a um carregamento, independentemente do nível de tensões. Geralmente os projetos ou problemas enfrentados pelos engenheiros não incluem materiais submetidos ao seu limite de escoamento, à exceção dos projetos aeroespaciais (Kimbal, 1999).

O termo resistência tem como principal característica a quantidade de carregamento que a estrutura, no caso chassi, poderá suportar antes que ele entre em colapso (Kimbal, 1999).

4.3. RIGIDEZ TORCIONAL

Nessa seção será apresentada uma simples metodologia e análise técnica na determinação da rigidez torcional de um chassi veicular, de acordo com a referência de RILEY e GEORGE (2002). A figura 10 ilustra o modelo teórico para obtenção da rigidez torcional.

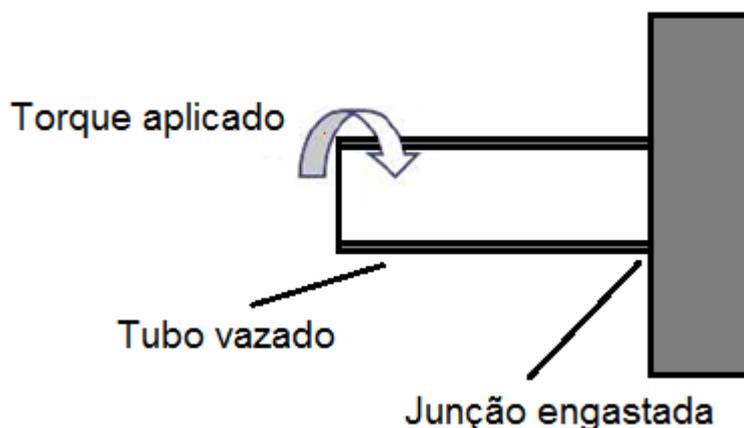
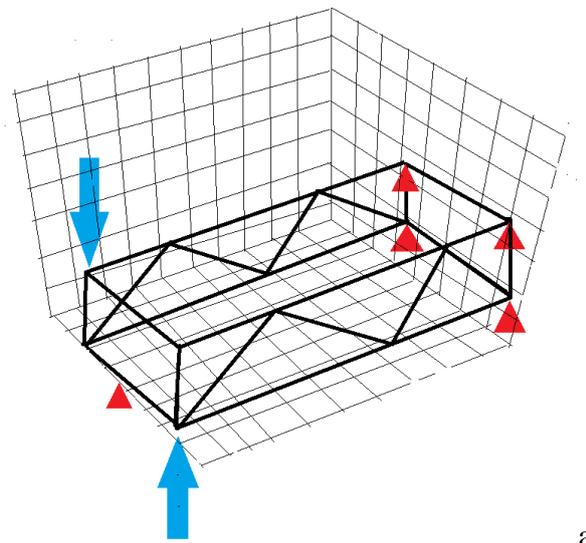


Figura 10 - Modelo teórico rigidez a torção. (Riley & George, 2002)

O modelo da figura 9, demonstra a fixação de uma extremidade de um tubo a uma superfície rígida, bem como a aplicação de um binário (momento), com relação ao seu eixo longitudinal, na outra extremidade livre.

Analogamente, o modelo teórico pode ser aplicado a um chassi real. Toda extensão do tubo representa o chassi propriamente dito. A extremidade engastada do modelo teórico representa os pontos de ancoragem da suspensão traseira do veículo real. Por fim, a extremidade livre, no qual fora aplicado um binário, representa os pontos de ancoragem da suspensão dianteira ao chassi do modelo real.

Abaixo, a figura 11, ilustra a aplicação desse modelo a um chassi imaginário:



a

Figura 11 - Modelo teórico em um chassi imaginário. (Riley & George, 2002)

A rigidez torcional de chassi pode ser calculada pela razão do valor do torque aplicado nas fixações da suspensão dianteira, pela deflexão angular sofrida pela estrutura decorrente da aplicação do binário gerado no quadro dianteiro. De acordo com a equação [1]:

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad [1]$$

Onde:

K_t = Rigidez torcional do chassi;

T = Torque aplicado à estrutura;

θ = Deflexão angular média.

De maneira esquemática, de acordo com o diagrama de corpo livre representado pela figura 12, a equação [1] pode ser reescrita em função do binário aplicado sobre o chassi, do deslocamento linear dos pontos de ancoragem da suspensão e da distância entre o ponto de aplicação da força e o centro do veículo, tendo como referência o eixo longitudinal do chassi.

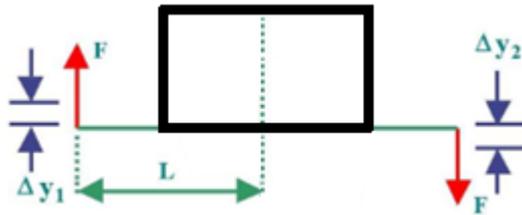


Figura 12 - Forças na ancoragem da suspensão dianteira. (Riley & George, 2002)

Pelo diagrama de corpo livre acima, o torque será duas vezes o produto da força pela distância do ponto de aplicação até o centro referente ao eixo longitudinal do chassi, conforme a equação [2]:

$$T = 2 * (F * L) \quad [2]$$

Onde:

T = Torque aplicado à estrutura;

F = Força aplicada que gerará o binário puro;

L = Distancia do eixo de simetria longitudinal ao ponto de aplicação da força.

A deflexão angular é o ângulo formado a partir do centro do veículo, referente a seu eixo longitudinal, até o ponto mais extremo deformado pela força aplicada ao

chassi. Abaixo, a figura 13 e a equação [3] ilustram as referências, bem como o cálculo da deflexão angular.

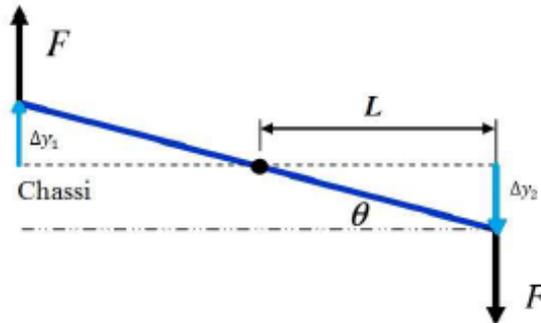


Figura 13 - Representação da flexão angular

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2 * L} \right] \quad [3]$$

Substituindo as equações [2] e [3], na equação [1], temos a equação [4]:

$$K_t = \frac{2 * F * L}{\tan^{-1} \left[\frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2 * L} \right]} \pi r^2 \quad [4]$$

Onde:

F = Força aplicada no chassi

Δy_1 = Deslocamento linear direito

Δy_2 = Deslocamento linear esquerdo

L = Distância do ponto de aplicação da força até o centro do carro.

Os valores médio de rigidez de chassi são apresentados no quadro 2, abaixo:

Tipo de veículo	Rigidez Torcional do Chassi
Fórmula SAE	300 – 3000 [Nm/deg]
Veículo Esportivos	500 – 50000 [Nm/deg]
Fórmula 1	5000 – 10000 [Nm/deg]

Quadro 2 - Rigidez de chassi média (SAMPÓ, 2011).

5. DADOS DO VEÍCULO OBJETO DE ESTUDO

Como citado anteriormente, o veículo objeto de estudo deste trabalho fora concebido com a finalidade de pertencer a uma categoria de acesso no cenário evolutivo da carreira profissional do automobilismo de Fórmula Monoposto. O veículo protótipo será utilizado para fins apenas desportivo nas provas de Track Day, principalmente nos autódromos de Brasília e Goiânia.

Nesse capítulo serão demonstradas informações acerca do chassi, propriedades, como material constituinte e geometria. Dentre os dados da geometria estão as dimensões do veículo, modelagem CAD, massa do chassi, posição de centro de massa.

5.1. MATERIAL CONSTITUINTE DO CHASSI

O material das barras e perfis que utilizam no chassi em análise é composto pela liga de aço AISI SAE 1020. AISI (American Iron and Steel Institute) se refere a entidade americana que classifica os aços liga. SAE (Society of Automotive Engineers), como o próprio nome sugere, significa a Sociedade de Engenheiros Automotivos, dos Estados Unidos da América.

Também, de acordo SAE, os dois primeiros algarismos (XX) contidos da nomenclatura AISI SAE XXYY, designam a classe do aço e os dois últimos (YY) a média do teor de carbono empregado, multiplicado por 100. Nesse sentido, a liga de aço 1020 possui percentual médio de carbono de 0,20%.

Dentre os aços liga, o aço carbono AISI SAE 1020 é um dos mais utilizados. É comumente utilizado em engrenagens, eixos, virabrequins, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capas, tubos, entre outros.

O quadro 3 abaixo representa um trecho retirado da tabela A-20 do livro Projetos de Engenharia Mecânica de Joseh E. Shigley (2004), referente a algumas propriedades do aço AISI SAE 1020.

N° SAE e/ou AISI	Processamento	Resistência à tração MPa (Kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (Kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Redução em Área, %	Dureza Brinell
1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
	CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131

Quadro 3 - Propriedades aço AISI SAE 1020

No quadro3 a informação principal que será utilizada é a resistência ao escoamento (Yield Strength), medido em MPa ou Kpsi. No caso da liga AISI 1020, esse valor é igual a 390 MPa. A resistência ao escoamento é uma magnitude de força que, se aplicada a uma estrutura, fará com que a mesma passe do regime de deformação elástica para o domínio plástico, onde há deformação permanente.

5.1.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO AISI SAE 1020

O aço da categoria AISI SAE 1020, em suma, é um aço carbono constituído basicamente de ferro, carbono, silício e manganês. A tabela 1 revela a composição da liga.

Elemento	Composição (%)
Manganês, Mn	0,30 - 0,60
Carbono, C	0,18 - 0,23
Enxofre, S	0,05 (máx)
Fósforo, P	0,04 (máx)
Silício, Si	0,21

Tabela 1 - Composição química aço AISI SAE 1020.

5.2. GEOMETRIA DO VEÍCULO

Tomando as formas geométricas do quadrado e do triângulo, figura 14, como sendo formas elementares de fácil construção, sabe-se que o triângulo em termos de carregamento é superior a forma geométrica de um quadrado. A forma do triângulo possibilita a construção de estruturas bastante firmes. Tomando inicialmente a forma geométrica do quadrado, é possível melhorar sua rigidez pelo uso de travamentos.

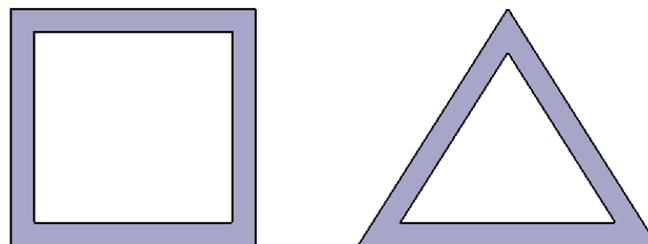


Figura 14 - Formas geométricas elementares de fácil construção

O travamento diagonal simples, figura 15, reduz demasiadamente a deformação sofrida nessa direção. Um duplo travamento diagonal, figura 16, garante uma rigidez consideravelmente maior (Adams, 1993).

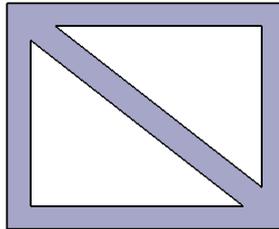


Figura 15 - Travamento diagonal.

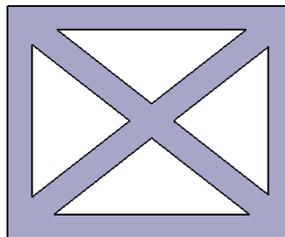


Figura 16 - Duplo travamento diagonal.

Outra opção que auxilia a melhora da rigidez diagonal de um quadrado é a utilização de painéis de metal de baixa espessura, substituindo os pesados tubos ou perfis. A figura 17 demonstra tal disposição geométrica:

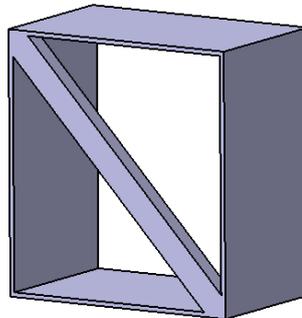


Figura 17 - Caixa de metal com travamento diagonal.

A geometria do modelo de estudo, por se tratar de um veículo real, fora obtida pela medição de todas as barras e tubos que o compõe.

Abaixo a figura 18 ilustra as principais cotas do modelo real, na figura 19 é demonstrado o veículo objeto de estudo, por fim na figura 20 uma breve ilustração de sua estrutura montada.

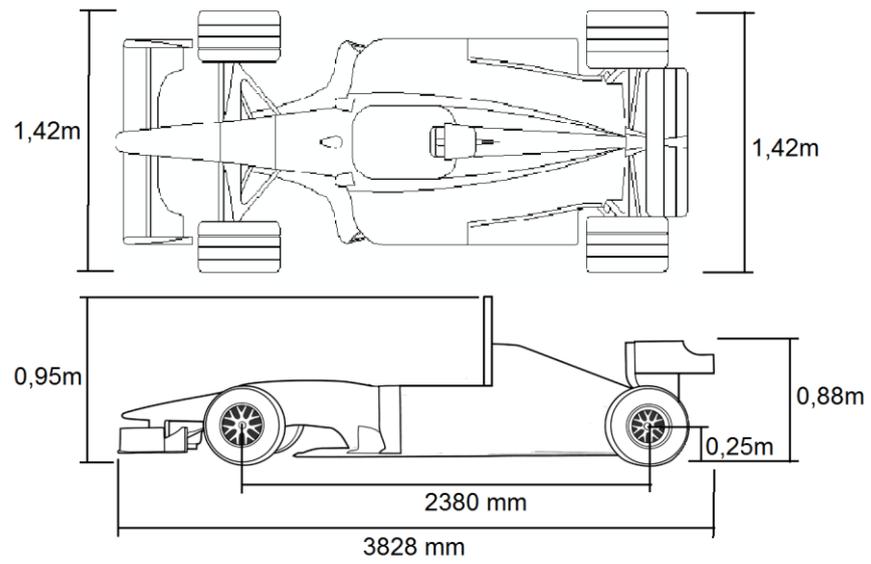


Figura 18 - Dimensões veículo objeto de estudo.



Figura 19 - Ilustração do veículo objeto de estudo com carenagem.



Figura 20 - Ilustração da estrutura montada do modelo de estudo.

5.2.1. MODELAGEM 3D DO CHASSI

A ferramenta utilizada para a criação do modelo *CAD* (*computer-aided design*) da estrutura do veículo de estudo foi o pacote comercial Catia V5. O software pode ser utilizado tanto na fase de projeto, bem como na análise da fabricação de variados produtos.

Em sua construção a estrutura do chassi utiliza quatro tipos diferentes de barras e tubos metálicos, sendo três retangulares e um circular. Todos os quatro perfis com a mesma espessura de parede cujo valor é igual a três milímetros. A figura 21 ilustra os quatro tipos de perfis utilizados.

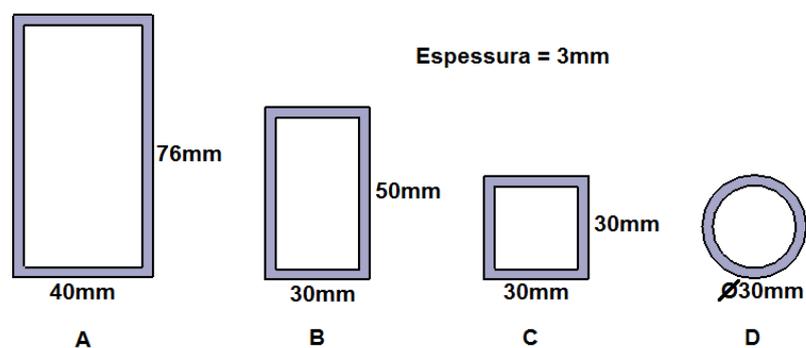


Figura 21 - Quatro tipos de perfis utilizados na construção do chassi.

A figura 22, ilustra a vista isométrica do modelo 3D da estrutura real do modelo em análise.

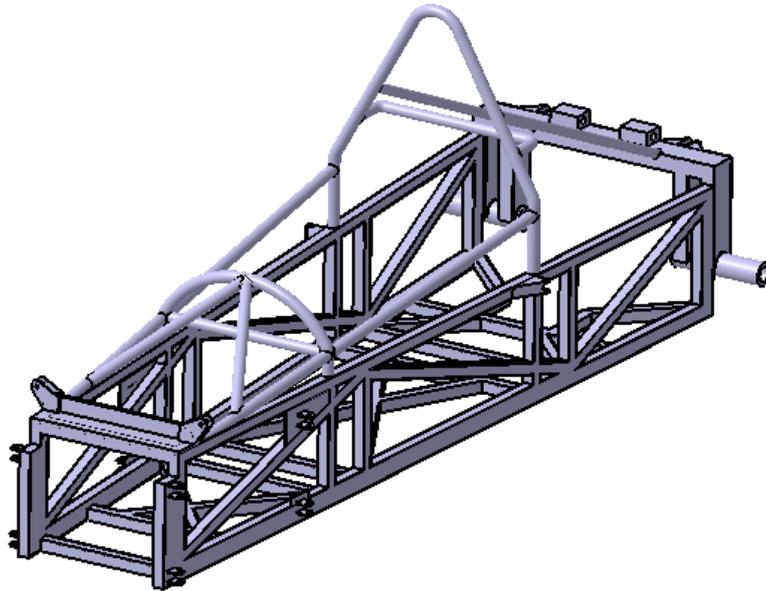


Figura 22- Vista isométrica modelo 3D chassi.

De acordo com a figura 22, ressaltando o que fora dito na seção 5.2, é possível observar que o chassi do veículo de estudo utiliza simples formas quadradas e tubulares. Com o objetivo de aumentar sua rigidez, travamentos diagonais simples e duplos foram utilizados por toda sua estrutura.

Diretamente da aba de medição da inércia (*Measure inertia*) do *Software CATIA V5*. É possível conhecer a massa total do modelo 3D que é exibida abaixo no quadro 4.

Massa do modelo 3D (CATIA V5)	96,854 [Kg]
--	--------------------

Quadro 4 – Massa total do modelo 3D.

A figura 23 ilustra as principais cotas do chassi do modelo 3D nas vistas superior e lateral. Diferentemente das cotas apresentadas no item 5.2, as cotas abaixo referem-se apenas à estrutura do chassi. Desse modo não contam com o kit carenagem ou mesmo suspensão traseira e dianteira, por exemplo.

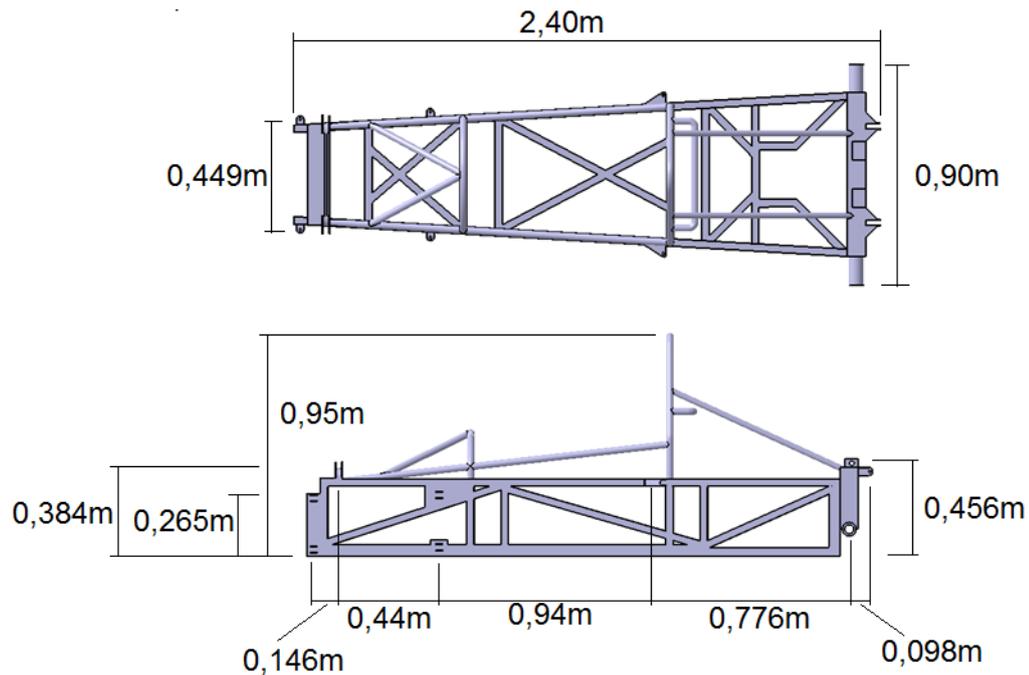


Figura 23 - Principais cotas do chassi do modelo 3D

5.2.2. MASSA DO VEÍCULO

A obtenção da massa total do veículo, se justifica pela necessidade de conhecimento das reações em âmbito estático que cada apoio suporta, assumindo que o veículo permanece na condição de peso em ordem de marcha (ride height). Isto é, o veículo com peso pronto para rodar, todavia sem passageiros. Essa medida será necessária para que posteriormente os dados aqui encontrados possam ser utilizados nas análises subsequentes do trabalho.

A massa total dividida por eixo pode ser obtida em piso devidamente nivelado e com o auxílio de quatro balanças digitais, uma para cada roda. A figura 24 ilustra a distribuição da massa em âmbito estático de $\frac{1}{2}$ veículo.

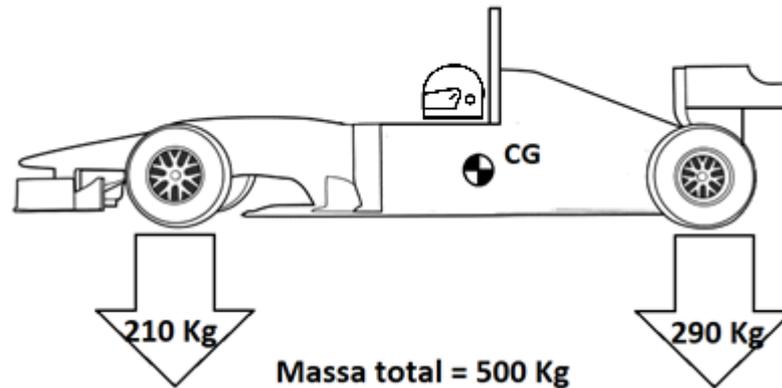


Figura 24 - Distribuição da massa em âmbito estático de $\frac{1}{2}$ veículo.

O uso do diagrama de $\frac{1}{2}$ veículo na distribuição da massa é por se considerar que a linha longitudinal do chassi coincide com a sua linha de simetria. A figura 24 nos revela que o veículo objeto de estudo possui distribuição de 42% da massa total aplicada ao eixo dianteiro e, conseqüentemente, 58% no eixo traseiro.

5.2.3. CÁLCULO DA POSIÇÃO DO CENTRO DE MASSA

Conhecendo a distribuição da massa em âmbito estático, de acordo com a seção anterior, e novamente com o veículo assumindo a condição de peso em ordem de marcha, ou seja, o veículo assume condição de inteiramente montado pronto a rodar, é possível calcular-se a posição global do centro de massa do Fórmula. E considerando que o eixo longitudinal do veículo coincide com a sua linha de simetria, entende-se que a componente lateral da posição do CG é igual à metade da bitola do veículo em análise. Dessa forma, resta saber as componentes vertical e longitudinal da posição do CG. A figura 25 ilustra a posição lateral do CG do veículo.

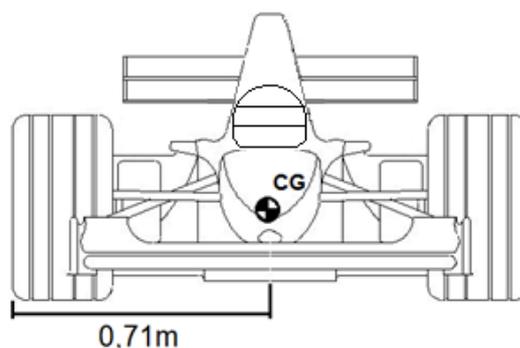


Figura 25 - Posição lateral do CG do veículo

A figura 26 abaixo ilustra o diagrama de ½ veículo necessário para obtenção da posição longitudinal do CG.

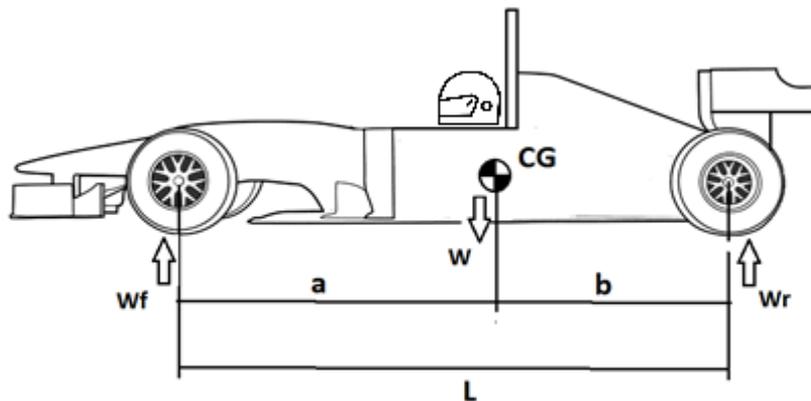


Figura 26 - Diagrama de ½ veículo para posição longitudinal do CG.

Os termos da figura 26 representam os dados veículo medidos experimentalmente com auxílio de balanças digitais e trenas:

- W = Peso total do veículo no CG;
- W_f = Peso nas rodas dianteiras;
- W_r = Peso nas rodas traseiras;
- L = Distância entre eixos;
- a = Distância eixo dianteiro a localização do CG;
- b = Distância eixo traseiro a localização do CG.

Com o somatório de momentos em torno do eixo traseiro obtém-se a localização horizontal do centro de massa. Conforme equações [5] e [6].

$$b = \frac{W_f * L}{W} \quad [5]$$

$$a = L - b \quad [6]$$

Para a localização vertical do CG é preciso levantar o eixo traseiro do veículo e assim posicionar as balanças apenas nas rodas do eixo dianteiro, afim de se registrar a transferência da massa para o eixo dianteiro por conta do plano inclinado submetido.

Abaixo a figura 27 ilustra o diagrama para a obtenção da posição vertical do CG, cujo os valores foram medidos experimentalmente com auxilio de balanças digitais e trenas

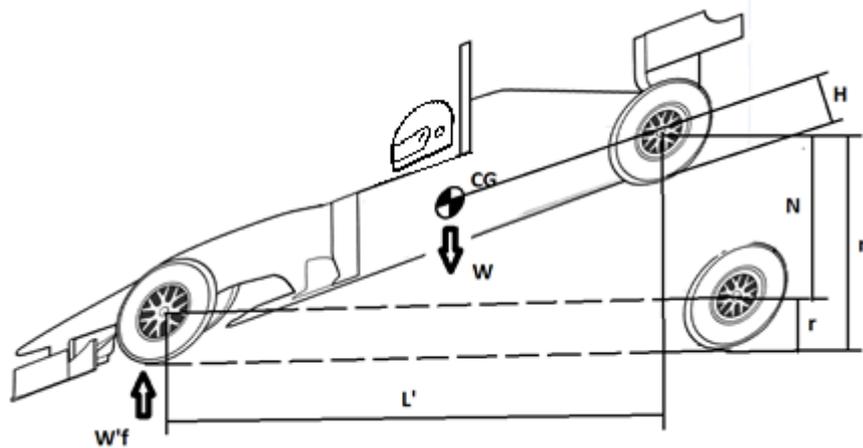


Figura 27 - Diagrama para a obtenção da posição vertical do CG

Os termos da figura 27 representam:

- H = Posição vertical CG;
- W = Massa total do veículo;
- $W'f$ = Peso inclinado nas rodas dianteiras;
- L' = Distância eixo dianteiro a linha vertical da roda traseira;
- N = Distância centro roda elevada ao centro da roda em posição nivelada;

- n = Distância centro roda elevada ao chão;
- r = Raio estático das roda.

Através de somatória de momentos, (Milliken, 1995) demonstrado pela equação [7], permite-se calcular a altura do CG:

$$H = r + \frac{(Wf' - Wf)L\sqrt{L^2 - N^2}}{WN} \quad [7]$$

5.2.3.1. POSIÇÃO GLOBAL DO CG DO VEÍCULO

Conforme mostrado no item anterior, a aplicação das EQUAÇÕES [5], [6] e [7], fornece a posição do centro de massa. Os dados obtidos do veículo real para o cálculo do CG a serem utilizados estão presentes na tabela 2.

W	500Kg
Wf	210Kg
Wf'	215,71Kg
L	2,38m
N	0,158m
r	0,25m

Tabela 2 - Dados obtidos para o cálculo do CG.

Substituindo os valores da tabela 2, nas EQUAÇÕES [5], [6] e [7], geram-se as EQUAÇÕES [8] e [9], componente longitudinal (a), com referência ao eixo dianteiro e a componente vertical (H) do CG, respectivamente.

$$a = 2,38 - 1,008 \quad [8]$$

$$H = 0,25 + \frac{(215,71-210)*2,38*\sqrt{2,38^2-0,158^2}}{500*0,158} \quad [9]$$

Resolvendo as EQUAÇÕES [8] e [9], e somando-as já conhecida componente lateral, temos a posição global do CG. A tabela 3 revela os resultados da posição global do CG.

Posição global do CG	
Componente lateral (Y)	0,71m
Componente horizontal (X)	1,372m
Componente vertical (Z)	0,2504m

Tabela 3 - Resultados da posição global do CG.

Abaixo a figura 28 ilustra a posição global do CG do veículo.

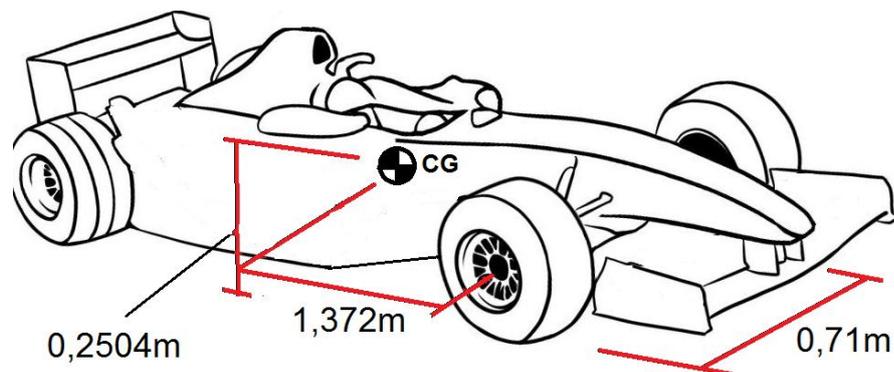


Figura 28 - Posição global do CG do veículo.

6. ESFORÇOS DINÂMICOS

Uma vez definidos os esforços estáticos, por ser um objeto móvel, se faz necessário a submissão do chassi a esforços dinâmicos para a avaliação de sua estrutura. Em detrimento disso, este capítulo tem por objetivo analisar um possível esforço crítico em caráter dinâmico.

A ferramenta utilizada para o levantamento das forças de interação pneu-estrutura será o pacote comercial CarSim 8.1.

6.1. PACOTE COMERCIAL SOFTWARE CARSIM

O *CarSim* é um *software CAE* (Computer-Aided Engineering), cuja finalidade é simular e analisar o comportamento dinâmico de veículos. Em sua biblioteca disponível, as opções de veículos abrangem desde modelos esportivos e veículos utilitários a até caminhões leves.

De forma geral, o *software CarSim*, auxilia no desenvolvimento, ajudando os engenheiros a tomarem melhores decisões em relação às possíveis mudanças a serem realizadas. Desta forma, é possível reduzir ou mesmo eliminar o uso de protótipos e testes físicos, contribuindo para a redução do tempo e o custo de desenvolvimento de veículos

6.2. ANÁLISE DO SOFTWARE CARSIM PARA O VEÍCULO OBJETO DE ESTUDO

Diferentemente de veículos de passeio, as condições do pavimento a serem consideradas, especialmente de um veículo de pista, desconsiderada a presença de paralelepípedos, buracos ou grandes irregularidades em sua superfície, como acontece em vias públicas para veículos de uso civil.

Pensando nisso, abaixo destaca-se possíveis situações onde o protótipo poderia ser submetido a condições na qual exigiria mais de sua estrutura.

Possíveis situações de exigência estrutural.

- Aceleração plena;

- Frenagem de emergência;
- Curvas;
- Pequenas irregularidades no solo (zebras);
- Pequenos objetos no traçado;

Segundo o Presidente da Federação de Automobilismo do Distrito Federal (FADF), Sr. Luis Caland, revela que em provas como o Track Day, por mais que a comissão de organização do evento faça inúmeras vistorias com relação à condição de pista, o chassi do veículo tem de ser capaz de suportar a grande maioria dos esforços, inclusive alguns imprevistos, como, por exemplo, uma peça de um outro veículo que esteja no meio do traçado.

Contudo, salienta que normalmente a transposição das zebras no decorrer das voltas, são os pontos onde o chassi é mais solicitado. Na tentativa de poupar alguns milissegundos do tempo de volta, a zebra é amplamente utilizada. A figura 29 exemplifica a utilização da zebra com essa finalidade.



Figura 29 - Exemplificação de utilização das zebras.

De acordo com o site pesquisador de assuntos acerca do automobilismo (projetomotor.com) a proposta original da FISA (atual FIA) acerca da utilização das zebras é servir como marco visual do fim das dependências do traçado e não como um atalho. Tanto isso é verdade que as primeiras zebras utilizadas nos meados dos

anos 50 eram demasiadamente altas, fazendo com que aqueles que insistiam por elas passar muitas vezes perdessem o controle do carro. A figura 30 ilustra tal situação.

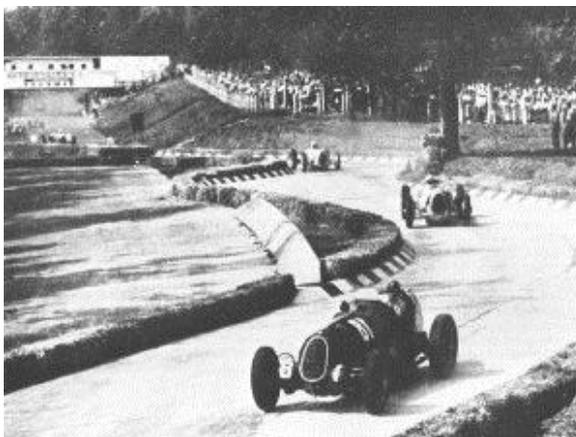


Figura 30 - Zebras utilizadas nos meados dos anos 50.

Hoje em dia as zebras tendem a seguir um formato padrão, ao menos nos circuitos homologados pela FIA a receberem os Grandes Prêmios da Fórmula 1. Ao ser questionado a respeito da configuração das zebras brasileiras utilizadas nos autódromos e pistas nacionais o presidente da FADF, Sr Luiz Calend, informou que cada uma é de um jeito.

6.2.1. TESTE DE VARREDURA SENOIDAL DE INCLINAÇÃO DE TRAVESSIA (CROSS SLOPE SINE SWEEP TEST)

No programa de dinâmica veicular utilizado, é possível trazer o software a realidade do modelo de veículo estudado pela calibração das variadas áreas de interação presentes nas abas de ajustes pelo software. O anexo 2 de maneira mais direta trata da parte de configuração da plataforma.

Após carregado o *software CarSim* devidamente com os dados do veículo, na tentativa de obter um teste que espelhe o mais próximo a realidade à condição de tráfego pelas zebras, o tipo de teste escolhido foi o Teste de Varredura Senoidal de Inclinação de Travessia (*Cross Slope Sine Sweep Test*), como é demonstrado abaixo pela figura 31.

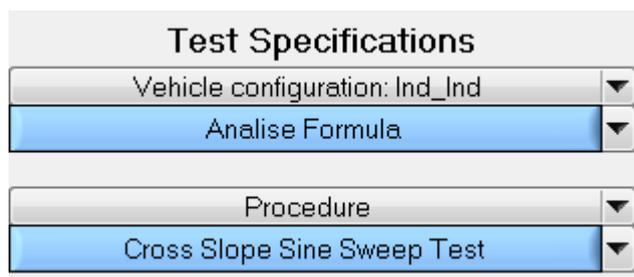


Figura 31 – Aba de configuração do tipo de teste e carroceria (CarSim 8.1).

No ambiente 3D do *software CarSim* utilizado, as dimensões do obstáculo na qual o veículo estará sujeito a transposição é listado a seguir:

- Altura = 3,5cm;
- Largura = 7m (largura da pista);
- Comprimento – 40cm

A figura 32 abaixo representa um recorte do *software* utilizado na qual explicita as dimensões do obstáculo configurado.

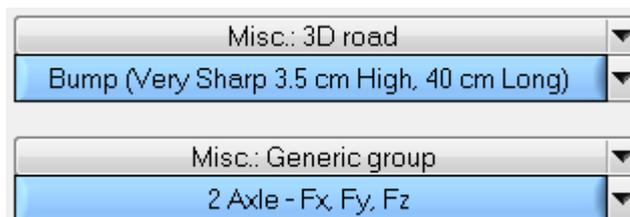


Figura 32 - Dimensões do obstáculo configurado.

Para o teste realizado, a velocidade ensaiada terá seu valor máximo de 130Km/h, apesar de não ser uma velocidade muito alta para o veículo em análise, é uma velocidade boa para analisarmos as forças que o veículo está sujeita ao transpor por tal obstáculo. Ao todo o teste possui três diferentes seções:

- A primeira é um trecho retilíneo;
- O segunda representa um trecho curvilíneo a ser percorrido;
- O terceiro é a região onde o obstáculo permanece, logo após que o trecho curvilíneo acaba.

A figura 33 abaixo, ilustra graficamente o obstáculo no ambiente 3D do *software* utilizado.



Figura 33 - Obstáculo no ambiente 3D.

Como é possível observar a figura 32 acima, o obstáculo no ambiente virtual mais se assemelha a um quebra-molas que a uma marcação do tipo zebra encontrada nas pistas de autódromos.

Em detrimento disso na tentativa de torna-lo mais dentro da realidade, o modelo do teste escolhido considera a posição do obstáculo sujeito à transposição do veículo, logo após o trecho curvilíneo. A ideia é o fazer com que o veículo possua uma distribuição desigual das reações dos apoios de sua estrutura ao solo.

Essa medida fará com que o chassi experimente o efeito da flexão combinada a torção de sua estrutura, bem como ocorre na condição real na travessia de um veículo a uma demarcação de zebra.

6.3. RESULTADOS DAS FORÇAS DINÂMICAS

Como mencionado, no cenário virtual o veículo percorre toda extensão do teste a velocidade máxima igual a 130Km/h.

No primeiro trecho o veículo experimenta uma aceleração longitudinal na intenção de atingir o ideal de velocidade máxima configurada. O que confere uma transferência de massa longitudinal do chassi.

A figura 34 abaixo ilustra através de vetores, as forças sujeitas ao veículo pela interação com o solo, destacando o efeito da transferência de massa longitudinal sofrida no trecho, onde os vetores do eixo traseiro possuem levemente maior intensidade.



Figura 34 - Trecho de seção retilínea com vetores de força dos apoios.

Ao executar uma aceleração positiva durante o movimento de arfagem (pitch), o veículo tem o seu peso transferido das rodas dianteiras para as traseiras. Esse evento promove um ganho de tração nas rodas traseiras ao mesmo tempo em que as rodas dianteiras tendem a perder. Como o veículo estudado é de tração traseira, o fenômeno beneficia a transferência da força gerada pelo conjunto mecânico ao solo.

Segundo Milliken (1995), pode-se calcular a transferência de peso do eixo dianteiro para o eixo traseiro de um determinado veículo durante a aceleração, pela equação [10] abaixo

$$\Delta_{long} = \frac{m \cdot a \cdot h_{CG}}{e} \quad [10]$$

ONDE:

- m = Massa total do veículo [Kg];

- a = Aceleração [m/s^2];
- h_{CG} = Coordenada do centro de gravidade [m];
- ee = Distância entre eixos do veículo [m].

No segundo trecho do percurso, que é configurado por uma curva à direita, o veículo nessa condição experimenta outro tipo de transferência de massa, a saber, a transferência lateral.

Na figura 35 é ilustrado através da leitura dos vetores destacados a maneira como os quatro apoios do veículo recebem carregamentos diferentes dada a condição do trajeto curvilíneo demonstrado.

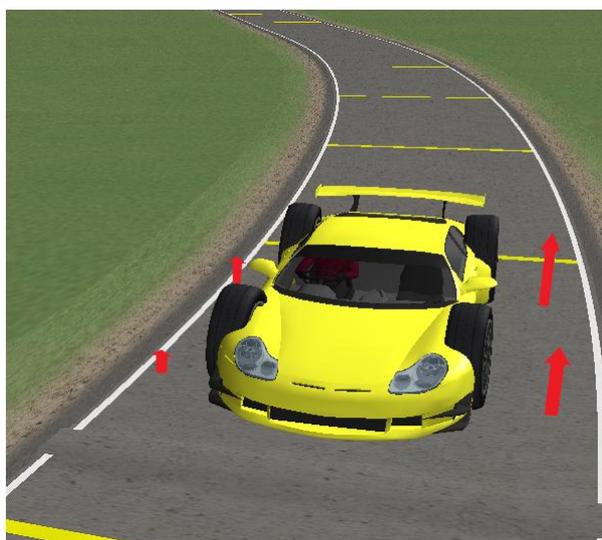


Figura 35 - Trecho de seção curvilínea com vetores de força dos apoios.

Como consequência da aceleração centrípeta experimentada pelo veículo na realização de curvas, o veículo obtêm uma transferência de peso lateral das rodas internas para as externas à curva. A quantidade de massa correspondente a essa transferência depende de alguns fatores como a velocidade, a altura do centro de gravidade e o raio da curva.

Segundo Milliken (1995), a transferência de peso lateral pode ser calculada pela equação [11] demonstrada abaixo:

$$\Delta_{lat} = \frac{m_p * a_c * h_{CG}}{t} \quad [11]$$

Onde:

- m_p = Massa do eixo analisado [Kg];
- a_c = aceleração centrípeta desenvolvida na curva a certa velocidade [m/s²];
- h_{CG} = Coordenada do centro de gravidade do veículo [m];
- t = Largura da bitola do referido eixo em estudo.

No último trecho percorrido está situado o obstáculo para a simulação de travessia de marcação do tipo zebra desejada. Como exposto na figura 34, o veículo percorre o trecho da curva cuja reações da interseção do veículo ao solo se mostra desiguais, isso fará com que a estrutura no instante do impacto da travessia do obstáculo sofra o efeito desejado da flexo-torção.

Abaixo na figura 36 é ilustrado no instante de tempo igual a 3,81 segundos da simulação proposta as forças de cunho dinâmico encontradas no ápice da passagem do obstáculo, simulando a travessia de uma marcação do tipo zebra.

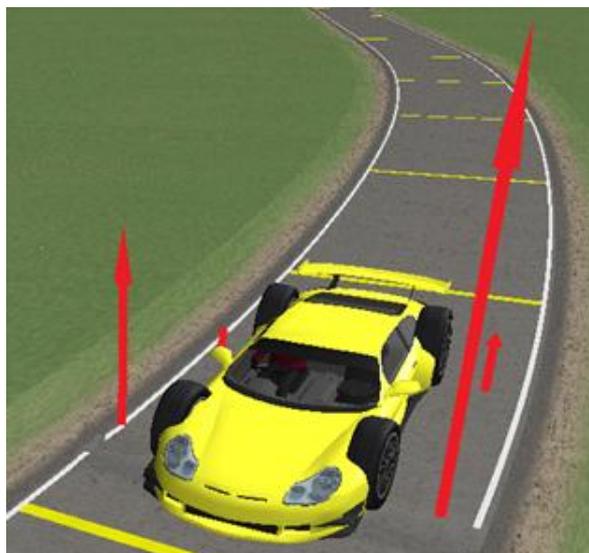


Figura 36 – Momento da travessia ao obstáculo e seus devidos vetores.

O interesse na análise realizada através do uso software *CarSim* versão 8.1, foi de extrair as forças no instante da travessia do obstáculo disposto ao modelo virtual.

No gráfico 1 é exposto as magnitudes das forças de reação em função do tempo da análise realizada, envolvendo a simulação da travessia representando um obstáculo do tipo zebra simbolizando o fenômeno experimentado da flexo-torção da estrutura do chassi do veículo objeto de estudo.

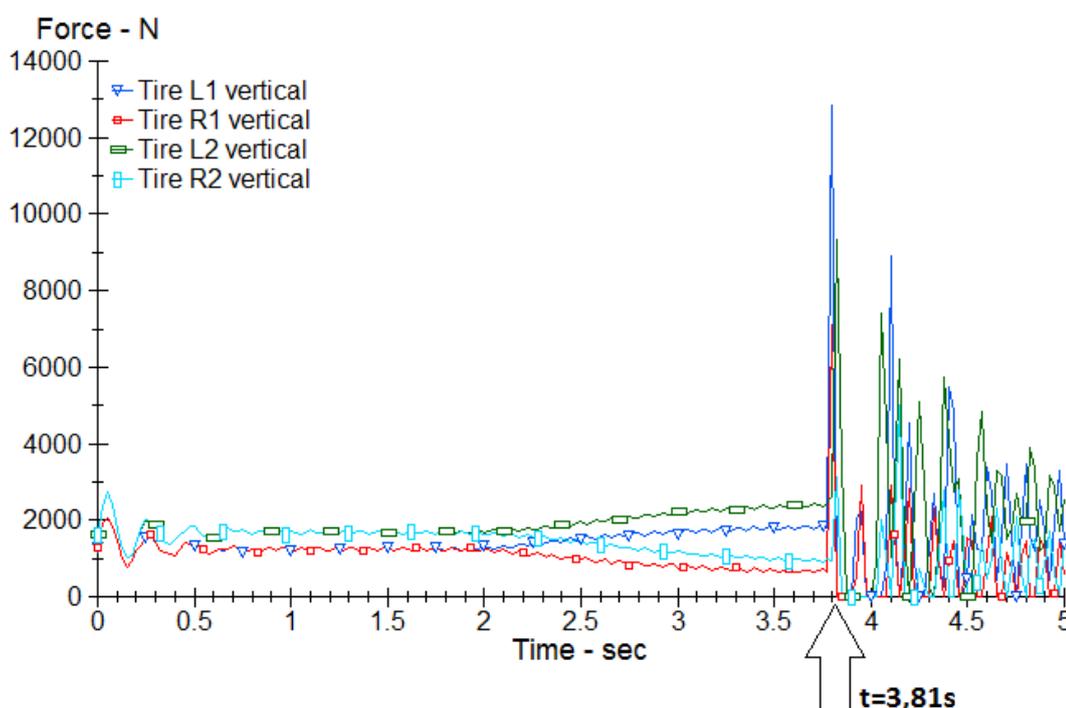


Gráfico 1 – Distribuição das forças no teste dinâmico.

Pela leitura do gráfico 1, indicado pela seta é possível observar o momento onde o veículo transpassa o obstáculo do tipo zebra considerado. Esse momento é referente ao instante de tempo igual a 3,81 segundos.

As forças extraídas no instante de tempo correspondente à 3,81 segundos, serão os esforços considerados nas análises estruturais com forças de cunho dinâmico que serão realizadas no decorrer do trabalho.

Abaixo o quadro 5, ilustra as forças utilizadas nas análises estruturais considerando esforços dinâmicos extraídos do *software* utilizado.

FORÇAS VERTICAIS ($t=3,81s$)	
L₁ (Roda dianteira esquerda)	12862,54 N
R₁ (Roda dianteira direita)	7108,89 N
L₂ (Roda traseira esquerda)	3300 N
R₂ (Roda traseira direita)	1380 N

Quadro 5 – Forças dinâmicas consideradas na análise realizada via *software CarSim*.

Para os capítulos destinados às análises estruturais, especialmente as do tipo flexo-torção, o quadro 5 será amplamente utilizada em todas as variações que a estrutura tiver ao longo do desenvolvimento do trabalho.

7. ANÁLISES ESTRUTURAIS DO MODELO 3D

Expostos nos capítulos precedentes, dados como: massa total, posição do CG, reações de apoio e cargas dinâmicas, são importantes informações do veículo objeto de estudo para a realização das análises estruturais do chassi no sentido de atender aos objetivos de compreensão e melhoria da qualidade torcional e da resistência de sua estrutura.

O pacote comercial que será utilizado é o *software ANSYS WORKBENCH 17.0*. Com ele será possível realizar as análises estruturais em cunho estático e dinâmico pelo uso das análises estática e modal.

A análise estática de estrutura tem por objetivo quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que são submetidos a uma estrutura sob carregamento qualquer, desconsiderando os efeitos de forças de amortecimento e de inércia. O software possui dois tipos de análises estáticas, linear e não linear. Sendo que as não-linearidades podem incluir plasticidade, tensão, rigidez e grandes deformações, por exemplo.

Já a análise modal serve para calcular as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura. Há diferentes métodos disponíveis de extração de modos (ANSYS,1998).

7.1. MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

A análise de estruturas provavelmente é a aplicação mais comum dos elementos finitos (J. Chaskalovic, 2008).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. Para melhor entender, o método subdivide o domínio de um problema em partes menores, denominadas por elementos finitos.

A subdivisão de um domínio geral em partes simples tem diversas vantagens:

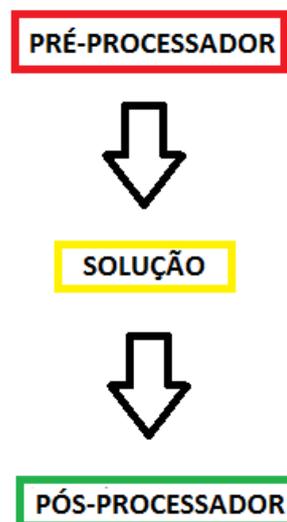
- Representação precisa de geometria complexas;
- Inclusão de propriedades distintas em materiais dissimilares;
- Identificação de efeitos localizados (Concentração de tensões).

Uma aplicação típica do método envolve dividir o domínio do problema em uma coleção de subdomínios, sendo cada subdomínio representado por um conjunto de equações que são elementos do problema original, seguido de recombinar sistematicamente todos os conjuntos de equações do elemento num sistema global de equações para o cálculo final. (J. Chaskalovic, 2008).

O objetivo do método dos elementos finitos na mecânica estrutural é encontrar uma função aproximada que satisfaça o sistema de equações diferenciais da teoria da elasticidade, obedecendo às condições de contorno do problema específico, com um grau de precisão satisfatório.

7.2. PROCEDIMENTO DAS ETAPAS DO ANSYS WORKBENCH

Para a análise de estrutura, o *ANSYS Workbench* subdivide o procedimento em três etapas. Conforme o quadro 6 abaixo demonstra.



Quadro 6 - Fluxograma das etapas de execução *Ansys*.

Seguindo o fluxograma exposto no quadro 2 acima, a primeira etapa, “*Pré-Processador*”, é feita a modelagem da estrutura, a definição do elemento estrutural e do tipo de material relacionado ao mesmo.

Na etapa subsequente, “*Solução*”, é realizada a definição dos tipos de forças atuantes na estrutura e suas condições de apoio e do tipo de análise que é desejada.

Concluída as etapas anteriores, a terceira e última, “*Pós-Processador*”, é feita a apresentação dos resultados da análise que fora configurada.

7.3. ANÁLISES CHASSI ANSYS WORKBENCH

Para atender aos objetivos do trabalho de compreensão e melhoria da qualidade da performance estrutural do chassi do veículo objeto de estudo. Essa seção tratará das análises cuja as condições de contorno, esforços e fixações, são oriundas dos dados considerados nos capítulos anteriores a serem carregados no *software de Métodos de Elementos Finitos, ANSYS, plataforma Workbench*.

Nesse contexto, foram realizadas quatro diferentes análises para a investigação das tensões admissíveis, deslocamentos totais e direcionais e dos modos de vibração pertencentes ao chassi do veículo de estudo. Estas quatro análises são:

- Análise estática;
- Análise de flexo-torção;
- Análise modal.
- Análise de deflexão para cálculo da rigidez de chassi.

Presente no anexo 3 ao final deste trabalho, é exposto o relatório disponibilizado pelo programa *Ansys, versão Workbench*, relatório das atividades realizadas referentes as análises aqui mencionadas.

Neste sétimo capítulo do presente trabalho, apenas a análise referente à deflexão para o cálculo do chassi será tratada em um capítulo à parte. As demais serão tratadas na sequência.

7.3.1. ANÁLISE ESTÁTICA

A começar pela análise estática, as forças atuantes consideradas, de acordo com os resultados de distribuição de massa e da massa total, obtidos na seção 5.2.2, que são oriundas da distribuição do peso estático do veículo sobre os de suporte da estrutura.

Pela simetria da estrutura, as reações nas fixações das suspensões dianteiras recebem uma força de magnitude igual a 1050N no sentido positivo do eixo Z. Por sua vez sobre as fixações das suspensões traseiras há forças de magnitude igual a 1450N também no sentido positivo do eixo Z. Os valores desses esforços foram extraídos da distribuição de massa do veículo. A figura 37, ilustra a aplicação desses esforços.

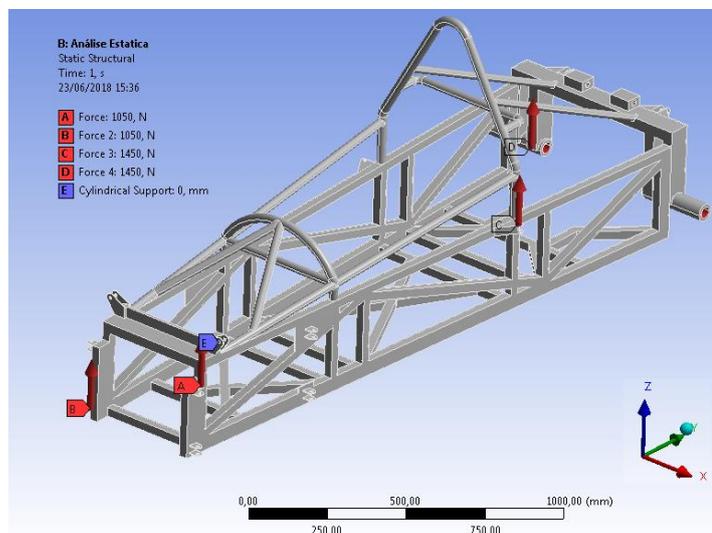


Figura 37 – Reações referente ao peso estático.

As superfícies selecionadas para a aplicação das forças, são destacadas em vermelho como é demonstrado pela figura 38. Nela é ilustrado a região da suspensão dianteira esquerda, onde a magnitude da força aplicada é igual a 1050N. Também na figura 38 é possível observar as orelhas (abas) de fixação dos braços inferior e superior, bem como a fixação superior do amortecedor ao chassi.

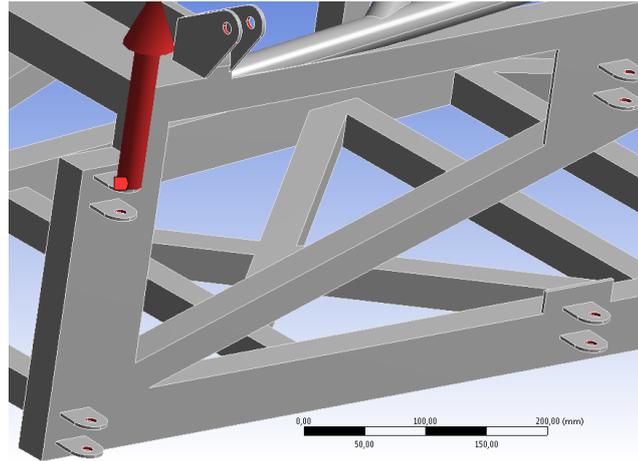


Figura 38 – Exemplo de área de aplicação do esforço.

Implementadas as forças atuantes sobre o chassi, é necessário impor ao mesmo uma fixação para que a análise possa ser realizada. Para tal, a fixação escolhida foi a do tipo suporte cilíndrico (*Cylindrical Support*). Esse tipo de restrição, quando liberado o movimento radial, simula aplicação de um pino, ou parafuso. A localização das restrições está nas abas da fixação superior dos amortecedores dianteiros e traseiros.

A figura 39 demonstra a região de aplicação dos pontos da restrição demarcadas em azul do amortecedor dianteiro esquerdo.

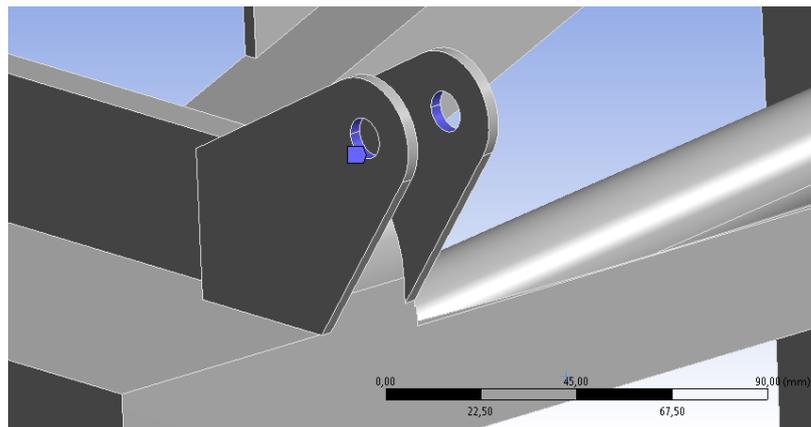


Figura 39 – Exemplo de região de aplicação de restrição.

7.3.1.1. RESULTADOS ANÁLISE ESTÁTICA

Os dados de saída escolhidos para a análise estática foram:

- Deformação total (Total Deformation);
- Tensão equivalente (Equivalent Stress)
- Dentro do pacote da análise de fadiga;
 - Tempo de vida;
 - Fator de segurança.

A deformação total se refere a combinação de todas as possíveis deformações em variadas orientações que o chassi suporta. A importância dela é de poder conferir visualmente a deformação decorrente dos esforços impostos.

A figura 40 ilustra a deformação total sofrida pela estrutura numa escala aumentada, bem como o mapeamento dos deslocamentos com base em cores. Estes deslocamentos tem como valores limites pertencentes ao intervalo de [0 a 0,13291mm]. Sendo que as regiões em azul escuro representam os pontos de menor deformação e as regiões em vermelho mais intenso referem se aos pontos de máxima deformação.

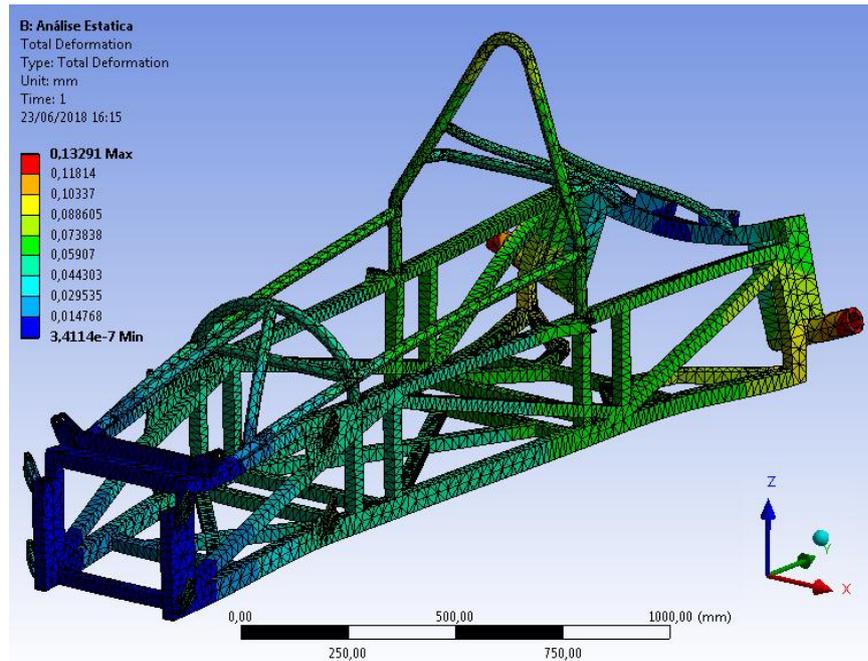


Figura 40 – Mapeamento de deformação total com carga estática realizada.

As tensões equivalentes são os esforços suportados pela estrutura decorrente da aplicação das forças sujeitas a mesma. Sempre tomando o valor limite da tensão de escoamento do material (σ_e), essa sub análise nos informa se a estrutura trabalha ou não dentro do regime elástico do material.

A figura 41 ilustra as tensões equivalentes absorvidas pela estrutura numa escala aumentada, bem como o mapeamento das tensões com base em cores pelo chassi. Estas tensões equivalentes pertencem ao intervalo de [0,0011034MPa a 93,231MPa]. Sendo as regiões em azul escuro os pontos de menor tensão e as regiões em vermelho mais intenso as de máxima tensão.

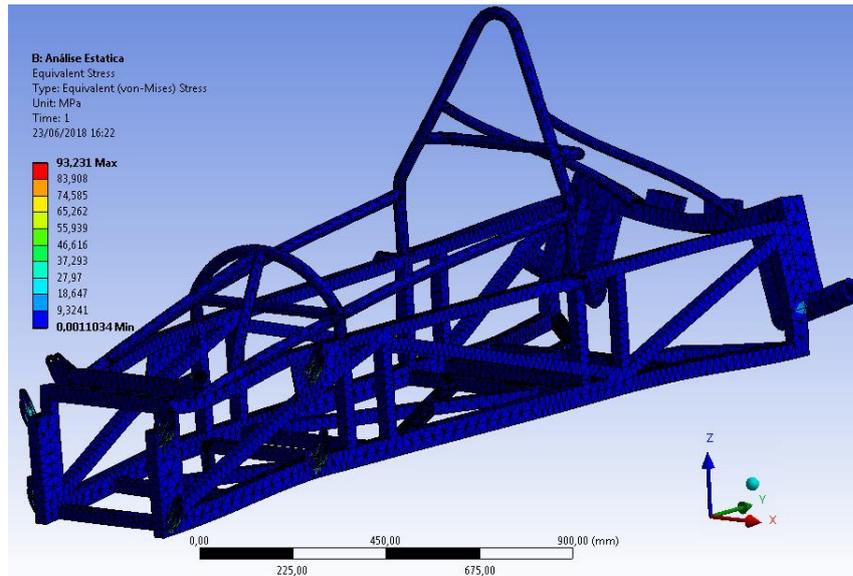


Figura 41 – Mapeamento das tensões equivalentes sob carga estática.

As sub análises do tempo de vida e fator de segurança, fazem parte do pacote da análise de fadiga disponível pelo *software ANSYS*. Com elas é possível verificar o tempo de vida medido em ciclos de toda extensão do chassi, bem como os fatores de segurança de cada parte constituinte da estrutura. Tais informações são importantes para o dimensionamento de qualquer estrutura.

A figura 42 revela a distribuição do tempo de vida em ciclos de trabalho.

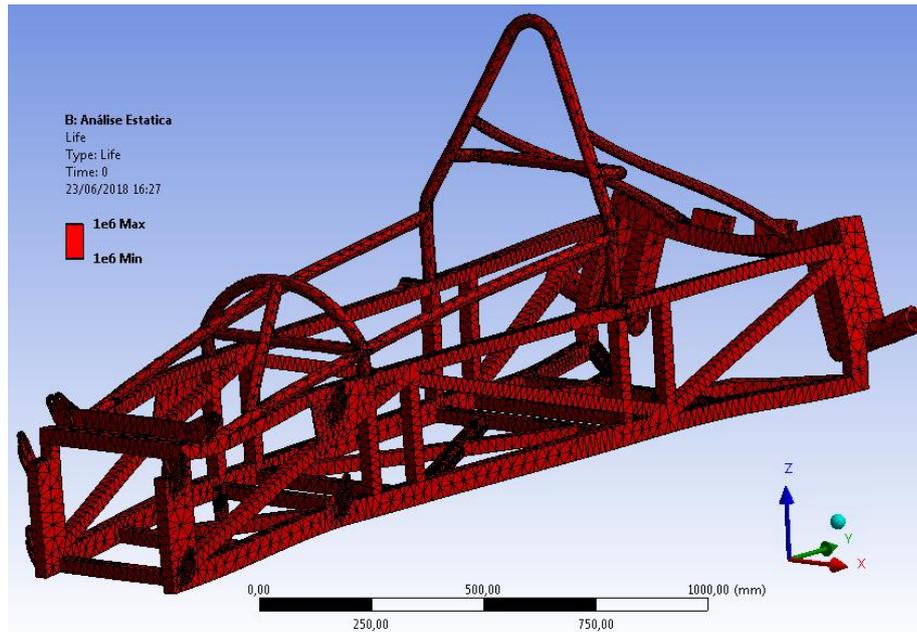


Figura 42 - Distribuição do tempo de vida em ciclos de trabalho.

Em seguida a figura 43 ilustra graficamente o campo dos fatores de segurança distribuídos pelo chassi.

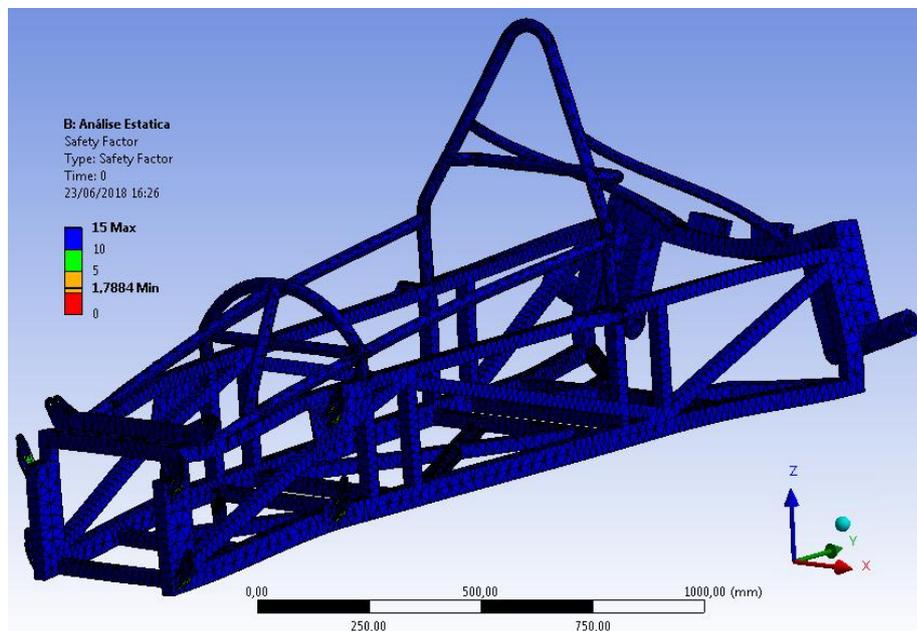


Figura 43 - Campo dos fatores de segurança distribuídos pelo chassi.

7.3.1.1.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE ESTÁTICA

Analisando o resultado do campo de tensões da análise estática do chassi, onde os esforços são apenas as reações ao peso estático com o veículo em inclinação zero, é possível observar que a tensão máxima (σ_{max}) encontra-se dentro da faixa do limite de escoamento (σ_e), do Aço 1020 (material do chassi). Nessas condições, a estrutura experimenta apenas deformações dentro do regime elástico.

$$\sigma_{max} = 93,231 \text{ MPa}$$

$$\sigma_e = 390 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} < \sigma_e$$

As deformações sofridas foram muito pequenas, o máximo deslocamento está na casa de décimos de milímetros, 0,13291mm. Assim, na sub análise de fadiga, tanto os tempos de vida quanto os coeficientes de segurança apresentam valores demasiadamente elevados, infinito e superior a 1.78 respectivamente.

A razão disso está no valor do carregamento ser baixo. Contudo, nessa condição do veículo parado em solo nivelado, apoiado ao chão pelos pneus é esperado resultados dessa magnitude.

7.3.2. ANÁLISE DE FLEXO-TORSÃO

Em sintonia com o que fora discutido no capítulo 3 entendem-se que a flexo-torção é a junção do efeito da flexão vertical ao da torção longitudinal. Em testes de qualidade de rigidez de chassi, a flexo-torção é um ótimo meio de verificação, pois engloba o principal fator para a determinação do desempenho de um chassi (torsão longitudinal), a outra também muito importante, como é o caso da flexão vertical (MILLIKEN, 1995).

O ensaio de flexo-torção é comumente utilizado para verificação de aprovação de uma estrutura, pois é considerado uma condição severa imposta ao chassi no caso de um veículo. Na prática o fenômeno é largamente experimentado, a exemplo disso, sempre que se passa por desnivelamentos ou irregularidades no solo como buracos

ou quebra-molas presentes no pavimento, a estrutura do veículo estar em flexo-torção.

Diferentemente da análise estática realizada na seção anterior, onde as reações eram provenientes do peso estático do veículo, para a análise de flexo-torção os esforços aqui considerados são oriundos daqueles encontrados no *software CarSim*, demonstrados na quadro 5 apresentado na seção 6.3.

A análise da flexo-torção realizada, permanece no âmbito da estática, porem as forças aqui aplicadas tem cunho dinâmico. Tais forças, foram extraídas do momento exato da transposição do obstáculo logo após o percurso da trajetória curvilínea apresentada na figura 36 da seção 6.3, caracterizando um comportamento de flexo-torção da estrutura do veículo.

No exato instante da travessia do obstáculo demonstrado no quadro 5 da seção 6.3, no eixo dianteiro sobre os pontos de fixação da suspensão esquerda há uma força de magnitude igual a 12862,54N, nos pontos de fixação da suspensão direita uma força de magnitude igual a 7108,89N, ambas no sentido positivo do eixo Z.

Já no eixo traseiro, sobre os pontos de fixação da suspensão esquerda existe uma força de magnitude igual a 3300N, por fim nas abas de fixação da suspensão direita há uma força de magnitude igual a 1380N, ambas também no sentido positivo do eixo Z.

Além das quatro forças mencionadas acima, há uma quinta força que representa o peso do veículo na posição do CG, o valor da força considerada tem magnitude igual a soma das quatro forças mencionadas no parágrafo anterior, cuja magnitude é igual a 24651,43N no sentido negativo do eixo z.

A figura 44 ilustra os vetores das cinco forças aplicadas sobre a estrutura nos pontos de fixação das suspensões e dianteiras e traseiras, bem como a representação da ação da força peso sobre o ponto do CG do veículo.

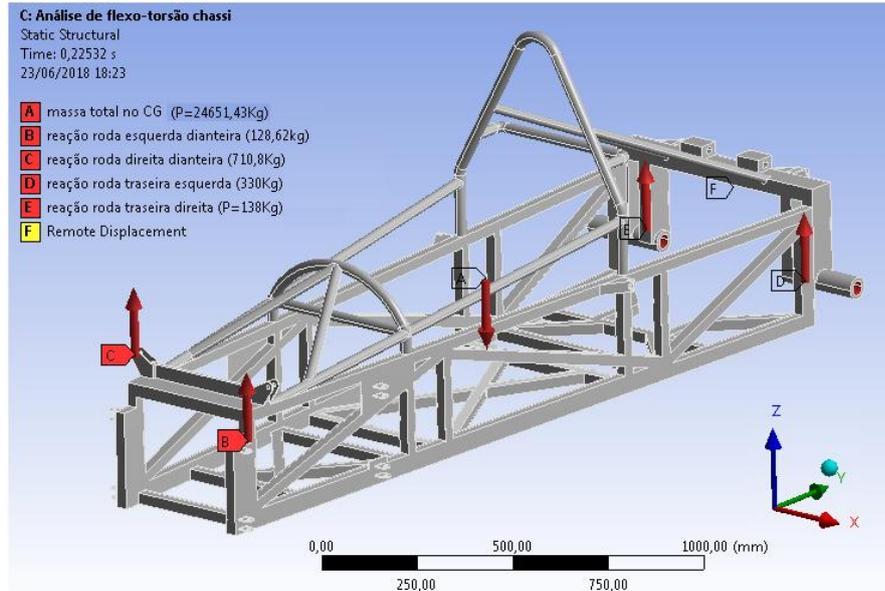


Figura 44 - Representação da ação das forças peso sobre veículo.

As superfícies selecionadas para a aplicação das forças, são destacadas em vermelho, conforme a figura 45 que ilustra como exemplificação o local da aplicação da força que atua sobre o CG do chassi, cuja magnitude é igual a 24651,43N no sentido negativo do eixo Z.



Figura 45 - Local da aplicação da força que atua sobre o CG do chassi.

As demais forças aplicadas seguem ao mesmo princípio utilizado na análise estática apresentada na seção anterior. Contudo, a natureza dos valores referentes aos esforços é dinâmica que fora considerada na seção 6.3 do trabalho.

Definidos os esforços, é necessário a aplicação de restrição de movimento para que a análise possa ocorrer corretamente, para isso foi utilizado a restrição do tipo deslocamento remot (*Remote Displacement*). Essa restrição, diferentemente de um apoio engastado, onde não permite deslocamento nem tão pouco rotação, permite ao modelo uma grau de liberdade simulando um apoio fictício, dessa maneira não interferindo nos resultados obtidos.

As regiões da aplicação da restrição para o modelo em questão são demarcada por áreas em amarelo conforme a figura 46 abaixo ilustra.

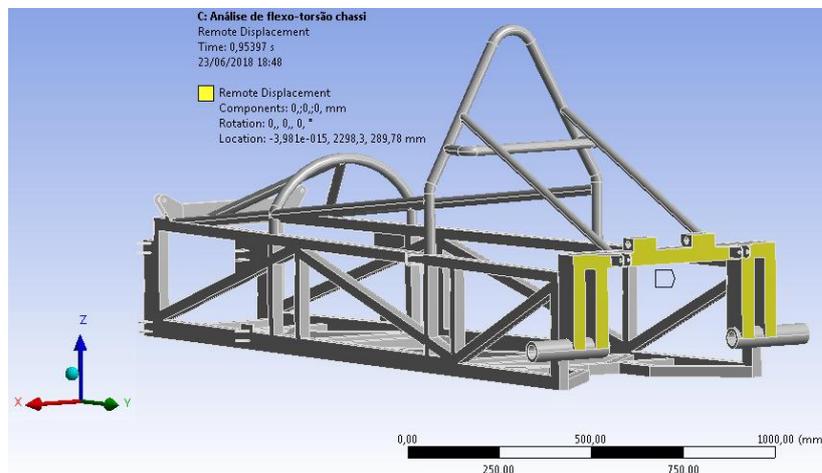


Figura 46 - Região da aplicação da restrição ao modelo.

7.3.2.1. RESULTADOS ANÁLISE DE FLEXO-TORÇÃO

Os dados de saída escolhidos para a análise de flexo-torção do chassi, assim como na análise estática apresentada na seção anterior são:

- Deformação total (Total Deformation);
- Tensão equivalente (Equivalent Stress)
- Dentro do pacote da análise de fadiga;
 - Tempo de vida;

- Fator de segurança.

Afigura 47 ilustra a deformação total sofrida pela estrutura em flexo-torção numa escala aumentada, bem como o mapeamento dos deslocamentos com base em cores. A máxima deformação total sofrida pela estrutura tem valor igual a 27,787mm, e como mínimo valor de deformação 0,12514mm.

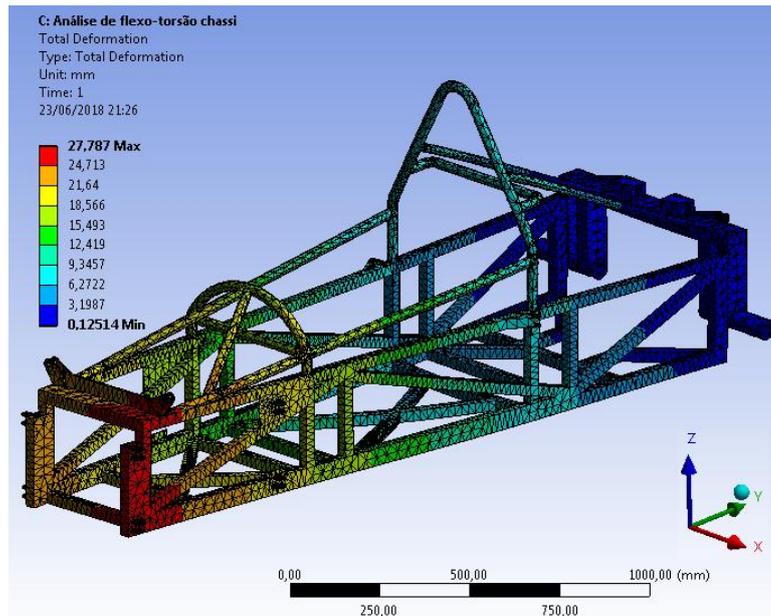


Figura 47 - Mapeamento dos deslocamentos dos deslocamentos sofridos em flexo-torção.

O campo do mapeamento da deformação total tem a cor azul representando as regiões de menor deslocamento, e na cor do vermelha intenso regiões de maiores deslocamento.

A figura 48 ilustra as tensões equivalentes absorvidas pela estrutura numa escala aumentada, bem como o mapeamento das tensões com base em cores pelo chassi.

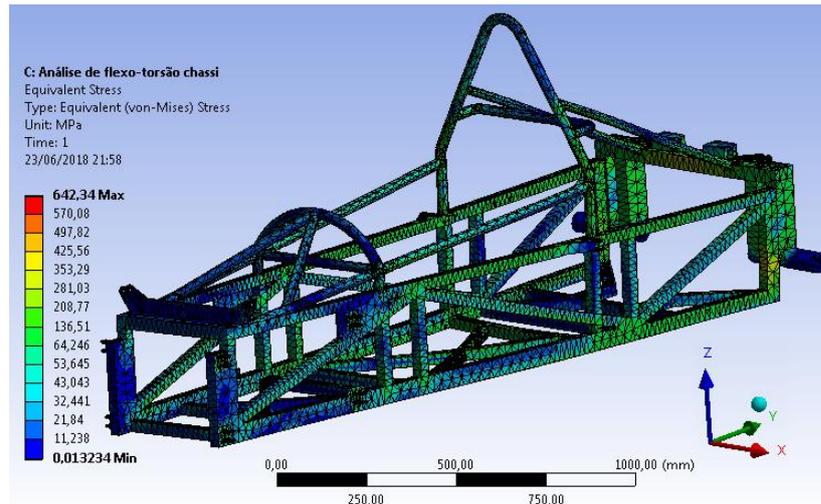


Figura 48 - Mapeamento das tensões equivalentes da estrutura em flexo-torção.

A mínima tensão absorvida pela estrutura tem valor igual a 0,013234MPa localizada nas regiões em azul escuro. A máxima tensão absorvida pelo chassi tem valor igual a 642,34MPa, localizadas nas regiões em vermelho intenso.

No ponto da máxima tensão equivalente absorvida pelo chassi, o limite de escoamento máximo do material fora ultrapassada, o que fará com que a estrutura falhe nessa região.

A figura 49 destaca a região de união do quadro traseiro da fixação da suspensão traseira à estrutura lateral do chassi onde o material deforma plasticamente. Essa ocorrência será discutida na seção de discussão dos resultados.

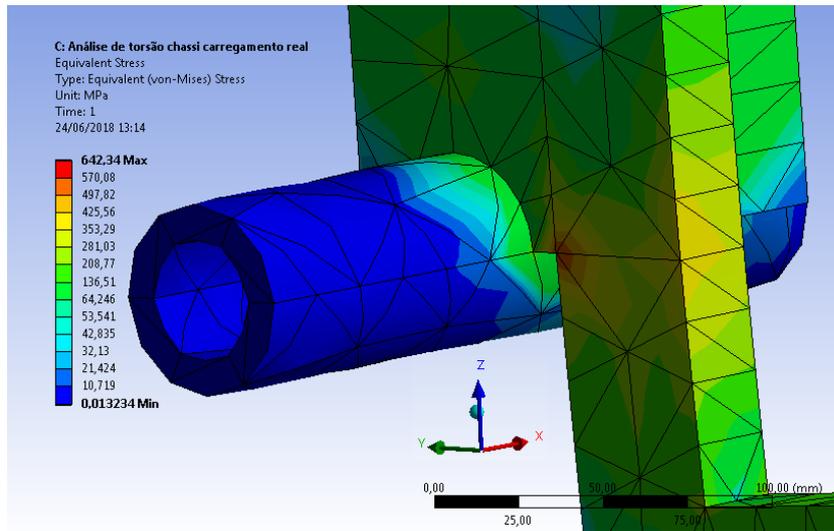


Figura 49 –Região propícia a falha pela por ultrapassar limite de escoamento do material.

Nas sub análises de tempo de vida e fator de segurança da análise de flexo-torção realizada, pelo fato de haver uma região onde o material deformou plasticamente, o tempo de vida da estrutura para esse tipo de deformação medido em ciclos, demarcado em vermelho intenso possui apenas 802,1 ciclos, as demais áreas estão próximas a vida infinita.

A figura 50 ilustra o campo do tempo de vida medido em ciclos de trabalho da estrutura sob análise de flexo-torção do chassi.

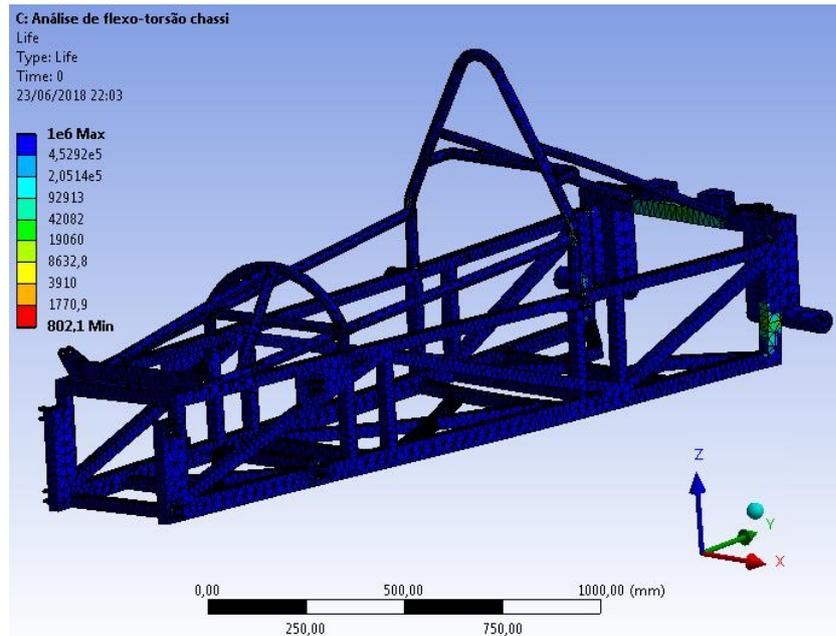


Figura 50 - Tempo de vida medido em ciclos de trabalho da estrutura.

A figura 51 ilustra o campo do fator de segurança pela estrutura sob análise de flexo-torção do chassi.

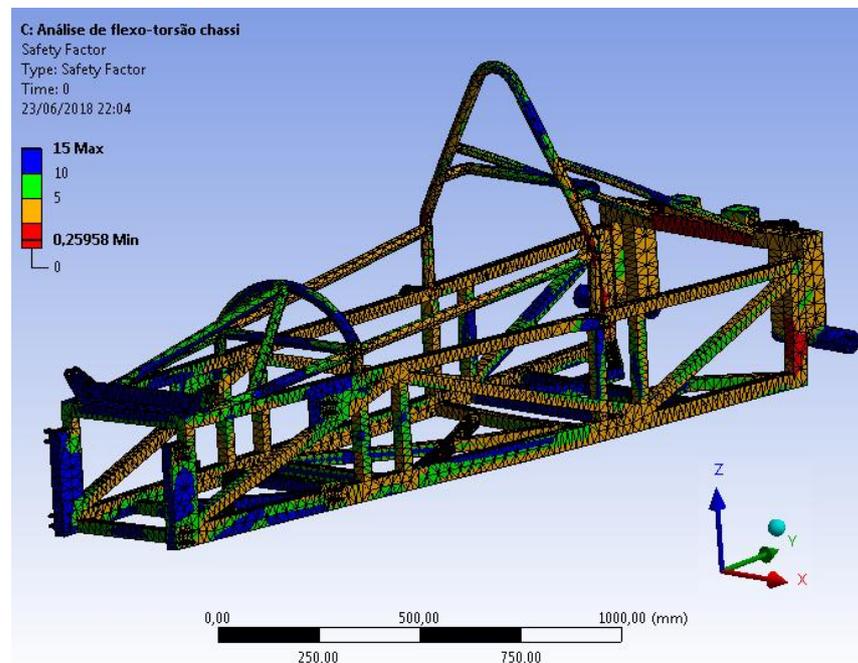


Figura 51 - Campo do fator de segurança pela estrutura.

O fator de segurança também é influenciado pela região de deformação plástica tendo como menor fator de segurança igual a 0,25958, ou seja nessa região o chassi falhará, nas demais áreas o valor do fator de segurança é superior a 5.

7.3.2.1.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE FLEXO TORÇÃO

Analisando os resultados do campo de tensões obtidas da análise de flexo-torção do chassi, a maior parte da estrutura possui tensão máxima (σ_{max}), inferior a tensão do limite de escoamento do material (σ_e) Portanto, essas regiões experimentam apenas deformações dentro do regime elástico.

A parcela na qual não se encontra dentro da faixa de regime elástico, pode ser explicada pela descontinuidade geométrica do modelo 3D, configurando uma região de acúmulo de tensão. Outro fator é que as forças aplicadas às fixações da suspensão, na prática, são filtradas pelos coeficientes de amortecimento dos pneus e do conjunto mola amortecedor das suspensões dianteiras e traseiras do modelo real, bem como a inclusão do motor e câmbio à estrutura, o que aumentaria a rigidez local. Desconsideradas aqui para aumentar o caráter exigente nas análises realizadas.

Seguindo as considerações a respeito da análise de flexo-torsão, o máximo deslocamento sofrido pela estrutura, como era o esperado, se encontra na região de aplicação da maior força gerada na simulação de transposição a um obstáculo, no caso uma possível zebra. Os maiores deslocamentos foram nas fixações da roda dianteira esquerda e tem valor medido de 27,787mm.

Quanto à sub análise de fadiga, o tempo de vida da estrutura em análise possui valor infinito em sua maior parte. Justamente nas regiões onde as tensões máximas excederam ao limite de escoamento do material é que esse tempo de vida é bastante reduzido, chegando a um valor mínimo próximo a mil ciclos.

O fator de coeficiente da estrutura sobre esse tipo de solicitação tem valor médio de 5. Contudo nas regiões que excederam ao limite de escoamento o fator de segurança é baixo, ou seja nessa condição o chassi falhará.

7.3.3. MODOS DE VIBRAÇÃO

A importância de conhecer os modos de vibrações e conseqüentemente as frequências naturais de uma estrutura é de possibilitar a ela uma melhor condição de usabilidade.

A análise modal é o processo que permite a construção de um modelo matemático que representa o comportamento dinâmico do sistema em análise, com o objetivo de determinar os parâmetros modais.

As frequências naturais indicam a taxa de oscilação livre da estrutura (SINGIRESU RAO, 2008), ou seja, representam o quanto a estrutura vibra quando não há força aplicada sobre ela. Esta frequência é função direta da rigidez, e inversa da massa da estrutura, medida em Hertz. Como uma estrutura possui diversas frequências naturais, a mais importante é a primeira, de menor valor, conhecida como a frequência fundamental.

Se a frequência da força atuante sobre o sistema for igual à frequência natural de vibração da estrutura, haverá o aumento da amplitude da vibração, fazendo a vibrar com maior intensidade. Tal fenômeno é chamado de Ressonância, o que deve ser evitado (SINGIRESU RAO, 2008).

7.3.3.1. FAIXA DE FREQUÊNCIA DE EXITAÇÃO

A ressonância é um fenômeno que deve ser evitado não apenas para a integridade física da estrutura do veículo, mas também para a saúde do piloto (M MITSCHKE, 1990).

As frequências de corpo humano apresentam em geral baixos valores. A figura 52 ilustra os valores médio em *Hertz*, das variadas partes do corpo humano, retirada de um artigo científico médico: *Ruído de Baixa Frequência, um problema para a Saúde Pública* (SAFEMED, 2015).

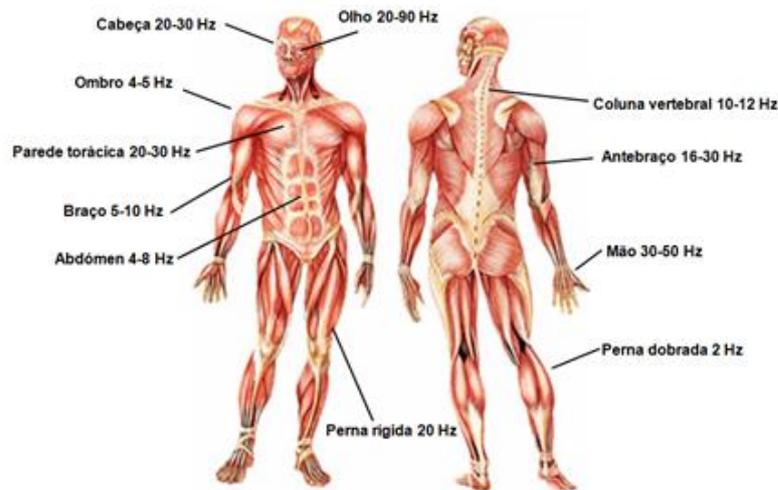


Figura 52 - Valores médio em Hertz, das variadas partes do corpo humano.

Para uma condução civil, o veículo está sujeito a uma frequência de excitação de pista média igual a 50Hz (Marek Borowiec, 2008). O aumento da velocidade causa a elevação do nível da frequência que a estrutura do veículo possa ser submetida, isso ocorre por conta do aumento da taxa a irregularidades que o veículo possa enfrentar.

Para a análise modal vigente, será adotado uma faixa de excitação de [0 – 100Hz], duas vezes maior ao intervalo de veículos de uso civil, de maneira a tornar a análise do chassi objeto de estudo mais exigente.

7.3.3.2. ANÁLISE DOS MODOS DE VIBRAÇÃO LIVRE DO CHASSI

Diferentemente das análises estática e de flexo-torsão do chassi, realizadas nas seções anteriores o modo na qual fora escolhido para a análise dos modos de vibração da estrutura não apresentam forças atuantes sobre o chassi, nem restrições de movimento, assim configurando uma condição modal de vibração livre.

O interesse em aplicar esse método é evidenciar as frequências naturais do chassi sem a intervenção de apoios quaisquer.

7.3.3.2.1. RESULTADOS ANÁLISE DOS MODOS DE VIBRAÇÃO LIVRE

Os dados de saída para a análise dos modos de vibração da estrutura em análise, são apenas os deslocamentos totais que a mesma irá sofrer de acordo cada frequência natural encontrada do chassi do veículo objeto de estudo.

Para a análise dos modos de vibração livre foram configurados como saída as quinze primeiras frequências naturais do chassi. O gráfico 2 abaixo ilustra os valores desses quinze modos de vibração da estrutura vigente.

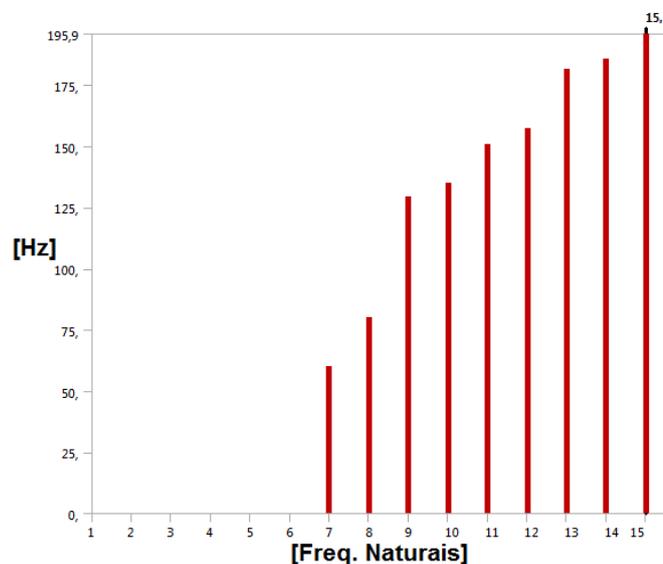


Gráfico 2 - valores dos quinze modos de vibração da estrutura em análise.

Como a análise fora realizada de modo livre, sem restrição, os seis primeiros valores são nulos. Dentro da faixa de frequência considerada para a análise, desconsiderando os seis primeiros modos, o chassi possui apenas dois modos dentro do intervalo estipulado para a análise modal compreendido por [0 a 100Hz].

A frequência fundamental do chassi ocorre a 60,229Hz configurando um modo de vibração mais voltado a uma torsão longitudinal.

A figura 53 ilustra o primeiro modo de vibração da estrutura conhecido como frequência fundamental com seus respectivos deslocamentos em milímetros.

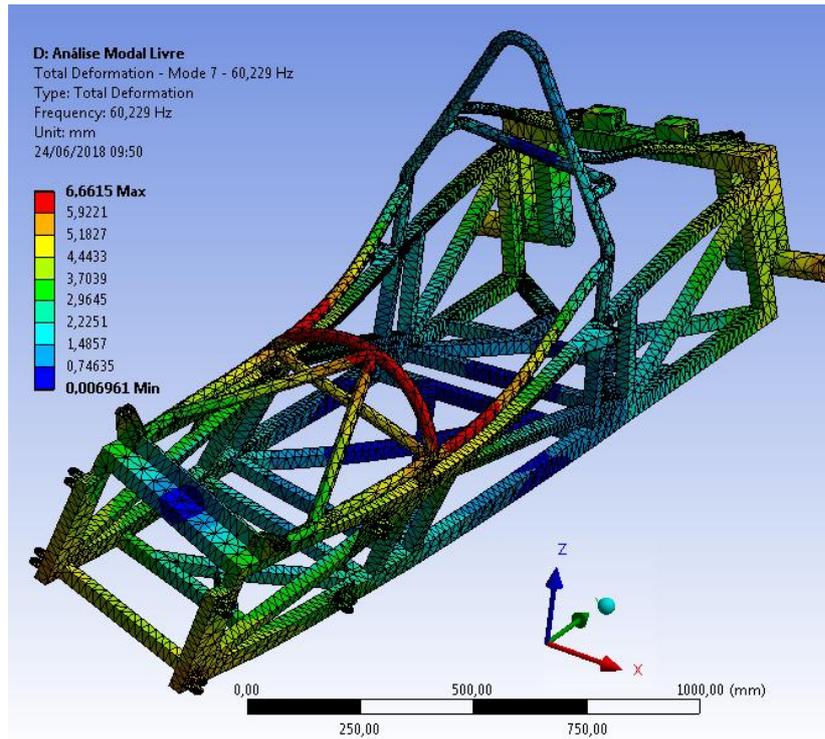


Figura 53 – Frequência fundamental da estrutura vibrando livremente.

O segundo modo contido no intervalo de interesse ocorre em 79,831Hz, configurando um modo voltado a flexão lateral do chassi.

A figura 54 ilustra o segundo modo de vibração da estrutura em análise modal livre e seus respectivos deslocamentos medidos em milímetros.

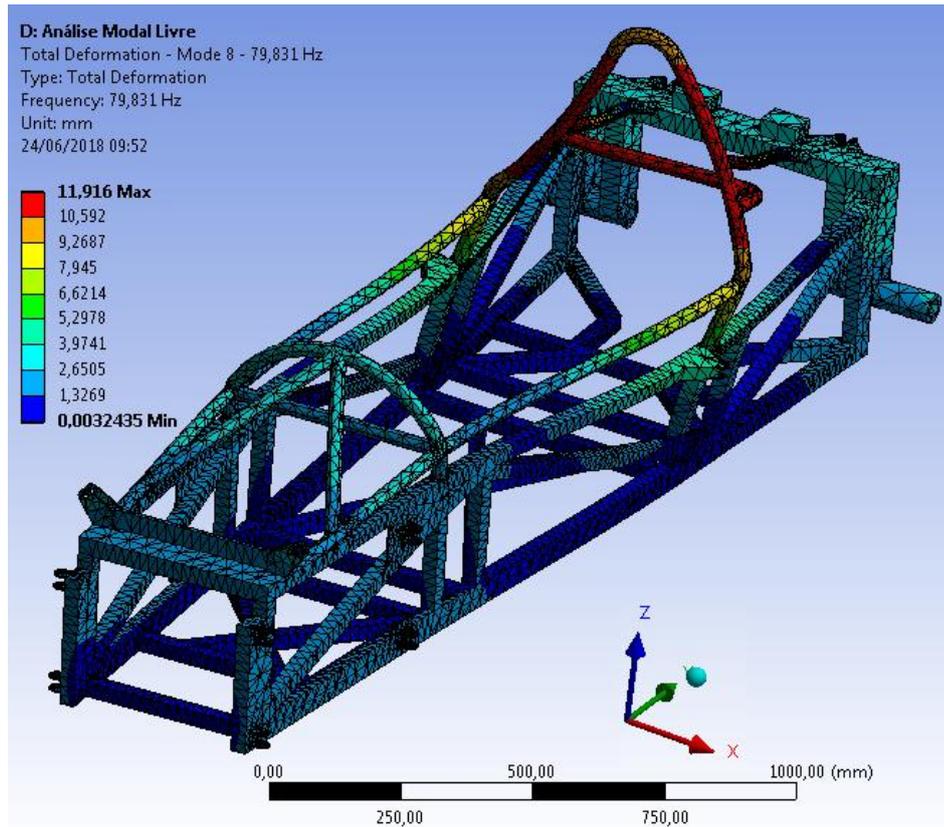


Figura 54 - Segundo modo de vibração da estrutura.

Acima do intervalo de [0 a 100Hz] considerado, a primeira frequência natural de excitação observada do chassi é o terceiro modo de vibração cuja frequência está em 129,18Hz. Ou seja 29,18% acima do limite superior do espectro de frequência de excitação considerado.

A Figura 55 ilustra o terceiro modo de vibração e seus deslocamentos.

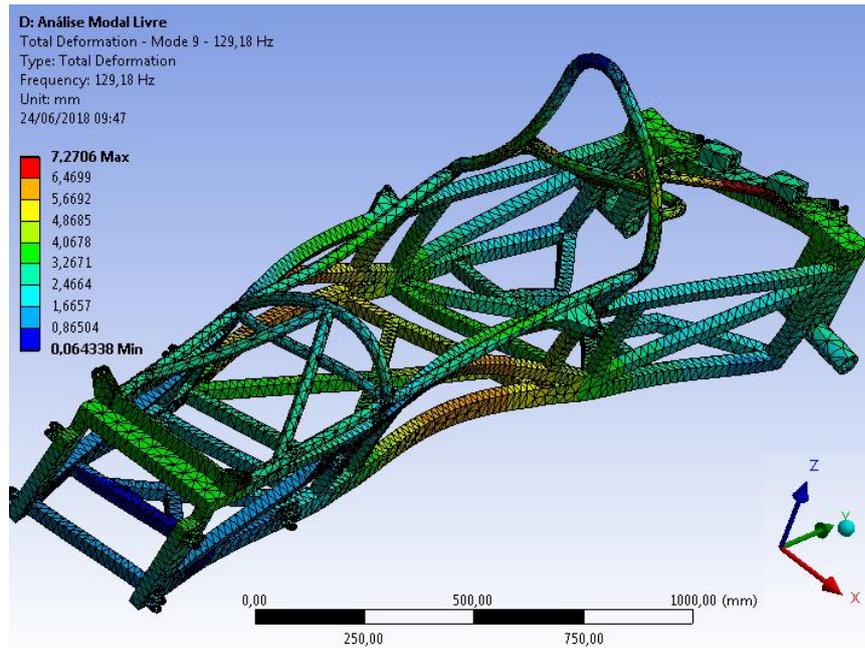


Figura 55 - Terceiro modo de vibração da estrutura.

Observando o terceiro modo de vibração ilustrado na figura 55 acima, a estrutura sofre uma deformação que combina a torção longitudinal à flexão lateral do chassi.

O primeiro modo de vibração do chassi que apresenta a flexão vertical, desconsiderando os seis primeiros que são iguais a zero, está presente no quinto modo de vibração. O valor da frequência natural do quinto modo é de 150,66Hz, 50.6% acima do limite superior da faixa do espectro de excitação considerado.

A figura 56 ilustra o décimo primeiro modo de vibração e seus devidos deslocamentos.

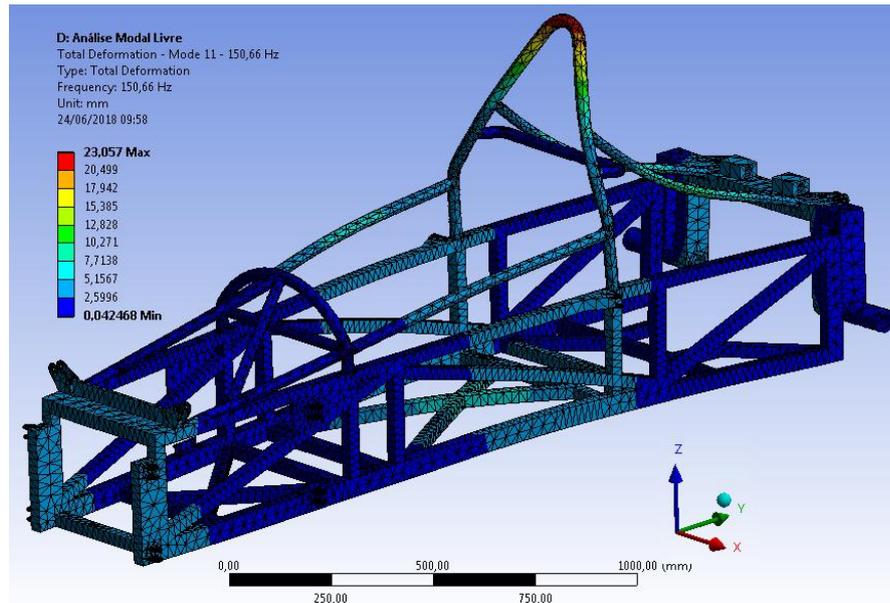


Figura 56 - Décimo primeiro modo de vibração da estrutura vibrando livremente.

7.3.3.2.1.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DOS MODOS DE VIBRAÇÃO

A análise modal livre revelou que o chassi possui uma frequência fundamental medida a 60,229Hz. Esse valor de frequência para veículos de passeio é satisfatória, uma vez que a faixa de trabalho de frequência para uso civil é de [0 a 50] Hz. Porém, para veículos de cunho esportivo como é o modelo analisado, o intervalo de interesse considerado é superior, considerado pelo intervalo de [0 a 100Hz]. Desse modo é disposto uma condição mais exigente a estrutura do chassi, como a frequência fundamental encontrada não satisfaz o requisito imposto, será necessário gerar modificações que beneficiarão o aumento de sua rigidez torcional.

Tendo em vista as três formas de deformação que uma estrutura pode ter, o chassi em análise é bastante suscetível a torções longitudinais e a flexões laterais dentro do intervalo de frequência determinado. Na frequência fundamental fora observado basicamente uma deformação longitudinal, o que explica esse modo tem relação ao habitáculo do piloto, bem como a parte traseira do chassi não ser providas de travamentos que auxiliariam a rigidez nesse modo como é observado na parte frontal da estrutura.

O assoalho, julgando pelos resultados, é a parte mais rígida do chassi, por razão dos vários travamentos laterais duplos, bem como pela utilização de um perfil retangular maior. Em razão disso, a estrutura veio a experimentar a deformação do tipo flexão vertical somente a uma frequência de 150,66Hz.

A grande vantagem de se conhecer a maneira como a estrutura vibra em suas diversas frequências naturais é que o engenheiro projetista pode alterar seu sistema a fim de o tornar mais rígido e dessa forma, modificar faixas de frequências que podem interferir no desempenho do chassi, ou mesmo danificá-lo.

8. ANÁLISE DE RIGIDEZ DO CHASSI VIA SOFTWARE

Na seção 4.3 fora discutido a maneira de obter o valor da rigidez torcional da estrutura do chassi objeto de estudo através da equação 1.

Nessa seção, pelo uso do *software ANSYS* será realizada a análise virtual de deflexão do chassi quantificando sua rigidez torcional. Posteriormente de modo a validar o modelo numérico, será realizado um teste físico em uma bancada projetada para analisar a rigidez torcional do chassi.

8.1. ANÁLISE DE DEFLEXÃO PARA CÁLCULO DA RIGIDEZ DE CHASSI

Para que ocorra a análise de deflexão do chassi em ambiente virtual pelo uso do *software ANSYS*, primeiramente a estrutura deve ser engastada na região do quadro traseiro das suspensões traseiras, através do uso da restrição do tipo suporte cilíndrico com as três orientações bloqueadas, dessa forma é simulado pontos de ancoragem como se estivesse soldado firmemente.

A figura 57 ilustra as regiões de engaste destacadas na imagem, correspondendo a região de fixação do eixo traseiro.

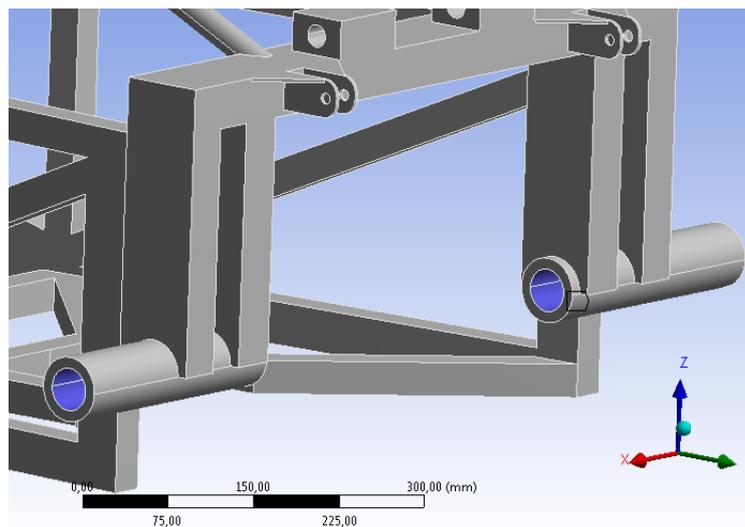


Figura 57 - Restrições de movimento para a análise de rigidez via *software*.

Já com relação aos esforços submetidos a estrutura, é necessária a aplicação de duas forças de mesma intensidade, mas com sentido contrário, situadas nas regiões dos pontos mais à frente das suspensões dianteiras do chassi.

A magnitude das forças é igual às reações do peso estático do veículo, 1050N no eixo dianteiro e 1450N no eixo traseiro, de tal modo que se localizam a uma distância de 0,2240835m com relação ao eixo longitudinal do chassi. Estas forças transformarão em um momento, ou binário puro cujo valor é igual a 470,57535Nm localizado na extremidade livre da estrutura. A figura 58 ilustra as regiões da aplicação das forças abaixo.

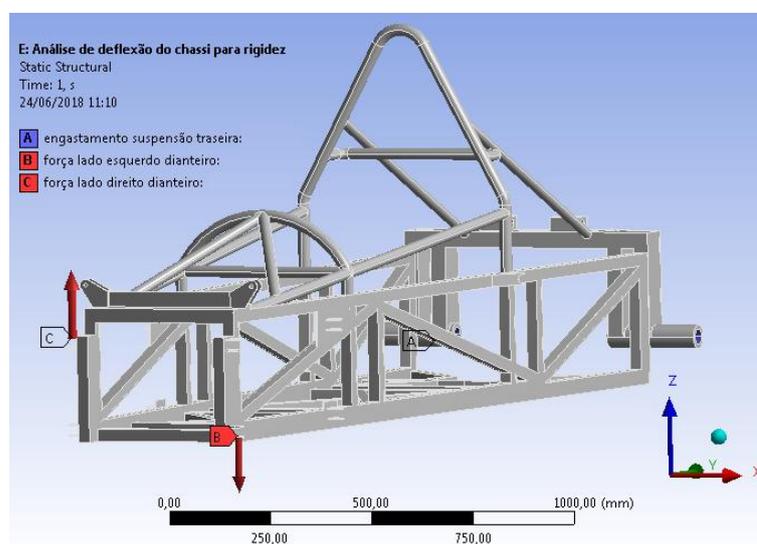


Figura 58 - Regiões da aplicação das forças que gerarão o binário puro desejado.

O dados de saída de interesse a ser conhecido por essa análise, são os deslocamentos lineares esquerdo e direito do quadro dianteiro do chassi pela deformação direcional no eixo Z, a saber o valor de sua rigidez torcional.

8.1.1. RESULTADOS DA ANÁLISE

Como mencionado, os dados de saída para a análise é a deformação direcional no eixo Z do quadro dianteiro do chassi. Essa deformação direcional irá fornecer os valores de deslocamento lineares esquerdo e direito, que através da equação 4 da seção 4.3, ser possível quantificar o valor da rigidez torcional do chassi em análise.

A figura 59 ilustra os deslocamentos lineares encontrados na análise de deflexão do chassi.

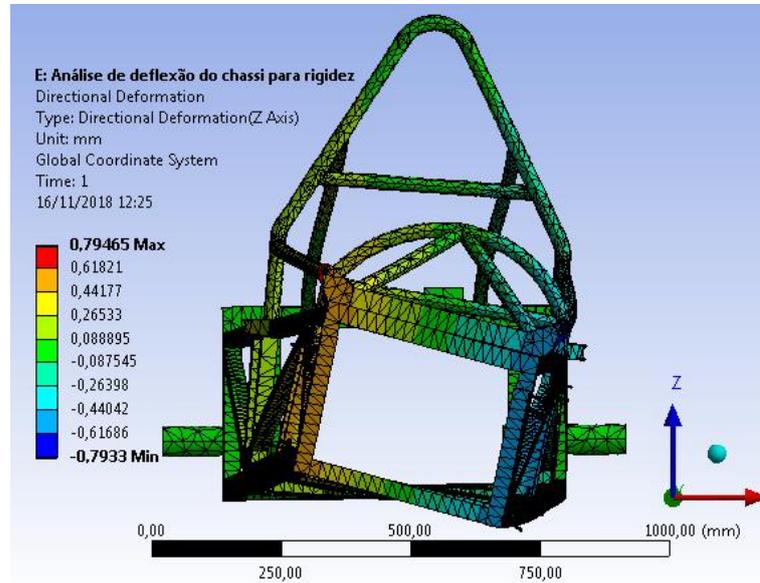


Figura 59 - Deslocamentos lineares encontrados na análise de deflexão do chassi.

A figura 59 acima informa que os valores referentes aos deslocamentos esquerdo e direito do modelo da estrutura em análise são de 0,79465mm e 0,7933mm respectivamente. Na próxima seção esses valores serão necessários para quantificar o valor de rigidez da estrutura em análise.

8.2. VALOR CALCULADO DA RIGIDEZ TORCIONAL DO CHASSI

Após a realização da análise de deflexão do chassi na determinação de seus deslocamentos lineares, pertencentes ao quadro dianteiro da extremidade livre do modelo em análise, bem como, o conhecimento das informações da geometria do chassi, discutido no capítulo 5 o valor da rigidez torcional do chassi investigado pode em fim ser calculada.

Abaixo no quadro 7 é exposto os valores a serem substituídos na equação 4 da seção 4.3 para o cálculo da rigidez torcional do chassi.

Dados para rigidez torcional de chassi	
Força (F)	1050N
Desl. linear direito (Δy_1)	0,0007933mm
Desl. linear esquerdo (Δy_2)	0,00079465mm
Dist. de aplicação da força (L)	0,2240835m

Quadro 7 – Valores considerados para o cálculo da rigidez torcional do chassi.

A equação 12 ilustra a equação matemática da obtenção da rigidez torcional do chassi (K_t), com os valores da tabela acima inseridos, a equação 13, expõe o valor obtido da rigidez torcional do chassi.

$$K_t = \frac{2(1050)(0,2240835)}{\tan^{-1}\left[\frac{(0,0007933)+(0,00079465)}{2(0,2240835)}\right]} \quad [12]$$

$$K_t = 2317,98 \text{ N.m/}^\circ \quad [13]$$

A rigidez torcional é uma propriedade da estrutura, portanto independente da força aplicada que se converte em um binário puro na metodologia. O valor absoluto da rigidez não é alterado. A aplicação de uma maior força será convertida a um binário puro de maior intensidade o que fará a estrutura torcer mais gerando maiores valores de deslocamentos lineares, contudo o valor da rigidez torcional do chassi não é alterado, uma vez que se trabalhe dentro do regime elástico do material.

9. ANÁLISE DA RIGIDEZ DO CHASSI VIA TESTE FÍSICO (BANCADA)

Em alguns casos, as análises realizadas pelo Método de Elemento Finito podem levar a resultados que não representam o fenômeno avaliado. Isso ocorre muitas vezes pela não representação adequada do modelo analisado, bem como as configurações das condições que formatam a análise serem inadequadas

Em razão disso, é necessária a comprovação experimental para a confirmação do resultado analítico. A grande vantagem de utilizar uma análise experimental, quando bem estruturada, é que sua leitura é extraída diretamente da estrutura, pelo uso de equipamentos de medição.

O objetivo desta seção é a comprovação do valor encontrado pelo Método dos Elementos Finitos, através do uso de uma bancada experimental capaz de fornecer medições confiáveis ao cálculo da rigidez torcional do chassi objeto de estudo.

9.1. METODOLOGIA

Na seção 4.3, fora demonstrado o modelo teórico de cálculo para rigidez torcional do chassi, o que fora utilizado na seção 8.2 na obtenção do valor da rigidez torcional via *software*.

Contudo, para simplificar o aparato a ser usado experimentalmente em bancada física, o binário puro gerado pela ação das duas forças aplicadas no modelo teórico, foram substituídas por uma única força que gera o mesmo torque localizado no eixo de simetria longitudinal da estrutura do chassi.

A figura 60 ilustra a viga rígida modelada em 3D em uso na bancada física.

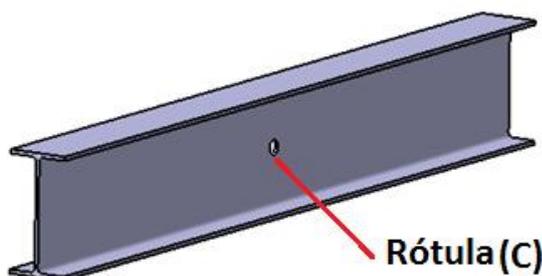


Figura 60 - Viga rígida modelada em 3D em uso na bancada física.

As vigas utilizadas na construção da bancada são do tipo I, cuja seção transversal é exposta na figura 61 abaixo.

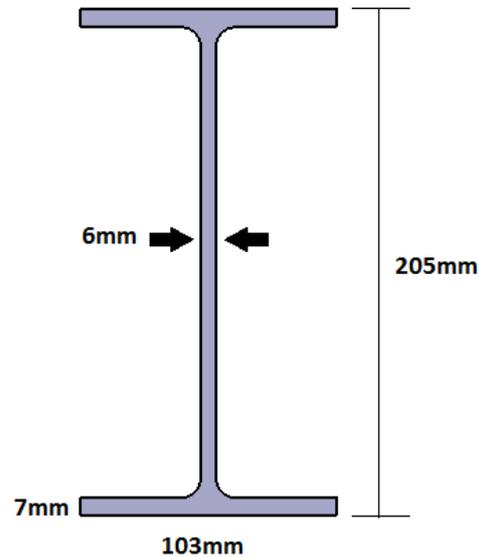


Figura 61 - Seção transversal da viga rígida.

O modelo apresentado no diagrama 1 abaixo considera as cotas, bem como a força a ser submetida à bancada para a realização do teste experimental da rigidez da estrutura.

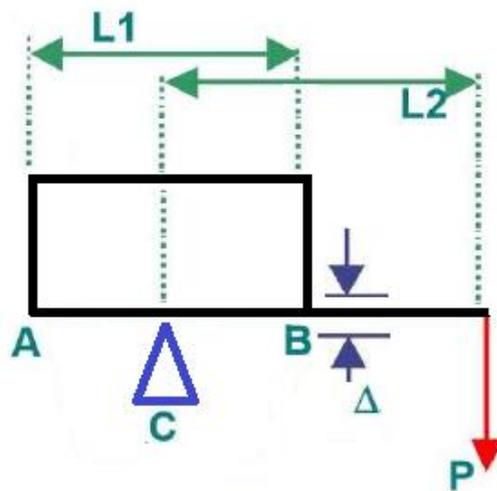


Diagrama 1 - forças na ancoragem da suspensão dianteira (RILEY e GEORGE, 2002).

Onde:

P = Carga aplicada para gerar o binário puro no eixo de simetria do chassi;

A = Representação dos pontos de fixação da suspensão dianteira direita no chassi;

B = Representação dos pontos de fixação da suspensão dianteira esquerda no chassi;

C = Rótula na viga;

L_1 = Distância entre as fixações da suspensão dianteira;

L_2 = Braço de alavanca com relação ao eixo longitudinal do chassi da aplicação da carga P ;

Δ = Deslocamento linear da barra/chassi.

O modelo apresentado no diagrama 1 é constituído por uma viga rígida horizontal, apresentada nas figuras 59 e 60, que será utilizada para a fixação da parte frontal do chassi pelos pontos A e B , bem como da aplicação de uma força P a uma distância L_2 da linha de simetria sobre o eixo longitudinal do chassi.

O ponto C é uma rótula do aparato para permitir a rotação da barra e conseqüentemente da parte frontal do chassi, assim gerando um deslocamento linear (Δ).

O chassi é firmemente fixado à barra rígida, nela uma força de magnitude P de cima para baixo, faz o chassi tender a girar em torno do ponto C . O torque gerado por essa carga e resistido pela ancoragem da suspensão traseira, na segunda parte da bancada, esse torque é igual ao produto da força P pela distância L_2 . De acordo com a equação 14 abaixo:

$$T = P * L_2 \quad [14]$$

A deflexão angular (θ) pode ser calculada através do valor de deslocamento linear (Δ) medido. Conforme a equação 15 abaixo:

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{2 * \Delta}{L_1} \right] \quad [15]$$

Sendo assim, a formulação para rigidez torcional do chassi para o modelo experimental de acordo com a equação 1 apresentada no capítulo 4 seção 4.3 é encontrada pela substituição das equações 14 e 15 na equação 1, demonstrado pela equação 16 abaixo:

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad [1]$$

$$K_t = \frac{P * L_2}{\tan^{-1} \left[\frac{2 * \Delta}{L_1} \right]} \quad [16]$$

9.2. ESFORÇOS CONSIDERADOS PARA A ANÁLISE

Analisando os esforços cortantes e momentos fletores presentes na análise de deflexão da estrutura apresentada na seção 8.2, para a condição do teste físico é necessário conhecer o valor da carga P que resultará em um binário puro na linha de simetria longitudinal do chassi para a obtenção do valor de sua rigidez torcional.

Tomando abaixo o diagrama 2 como referência da condição do teste virtual anteriormente realizado é possível analiticamente encontrar o valor do binário puro no ponto c gerado pelas duas forças aplicadas ao chassi.

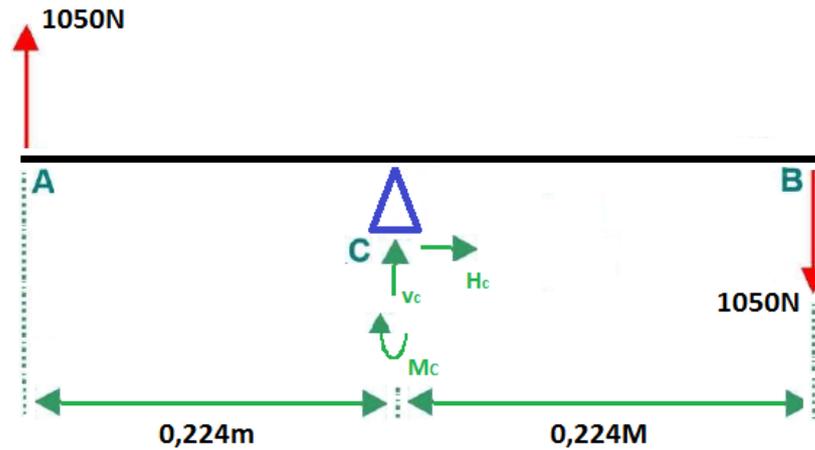


Diagrama 2 –Diagrama para cálculo do torque gerado no chassi.

Através do diagrama acima e das equações da estática, o valor do momento em C é apresentada pela formulação abaixo:

$$\sum M_c = 0 \quad \therefore \quad M_c = 2 * (1050 * 0,224) = 470,4Nm \quad [17]$$

Assim, para manter a mesma deflexão angular experimentado pelo modelo 3D, a carga P associada ao teste físico deve ser capaz de gerar um momento no ponto C igual a 470,4Nm.

Considerando o braço de alavanca L₂ previamente determinado em 0,588m medido da rótula da barra rígida, o valor da carga P que promove o torque desejado, exposto na equação 17 é demonstrado na formulação abaixo:

$$T = P * L_2 \quad [14]$$

$$P = \frac{T}{L_2} \quad \therefore \quad P = \frac{470,4Nm}{0,588m} \quad \therefore \quad P = 800N \quad [18]$$

A equação 18 acima, revela ser necessário uma carga de 800N a 0,588m do eixo longitudinal do chassi para fornecer os mesmos 470,4Nm suportados pela estrutura na análise via software.

9.3. MEDIÇÃO

Para a carga P de 800N necessária para a criação do binário puro sobre o eixo de simetria do chassi, foram utilizadas um conjunto de seis anilhas de aço fundido. Essa anilhas são normalizadas e foram conferidas suas massa com o auxílio de uma balança digital.

A figura 62 ilustra o conjunto de anilhas utilizado na medição do valor da rigidez torcional do chassi do veículo objeto de estudo.



Figura 62 - Conjunto de anilhas utilizado na medição

A posição do conjunto de anilhas na barra rígida como mencionado anteriormente está localizada a 0.588m com relação ao centro da barra, onde se localiza a rótula do aparato para a promoção da torsão a ser experimentada pelo chassi, esse mesmo ponto da rótula coincide com o eixo de simetria da estrutura avaliada.

A extração do valor do deslocamento linear (Δ) para o cálculo da rigidez, o instrumento utilizado fora um relógio comparador da marca *Mitutoyo*, cuja menor medida é de um centésimo de milímetro, possuindo valor máximo de medição igual a dez milímetros. O equipamento para a medição do deslocamento linear da barra rígida foi devidamente calibrado antes a sua utilização no experimento.

A figuras 63 ilustra duas imagens do relógio comparador utilizado, juntamente com sua base magnética.



Figura 63 –Imagens relógio comparador utilizado.

O relógio comparador fora fixado a 0,32m com relação à rótula da barra rígida, posicionado de forma tal que registrasse o quanto que a barra deslocaria nesse ponto. A figura 64 abaixo, ilustra o posicionamento do relógio comparador à bancada de análise.



Figura 64 - Posicionamento relógio comparador.

9.4. MODELO DE BANCADA EXPERIMENTAL PROPOSTO

Fazendo uso do *software CATIA*, o modelo da construção do teste físico fora desenhado para permitir uma melhor compreensão. A figura 65 revela o arranjo físico a ser ensaiado experimentalmente pela bancada com o chassi fixado a ela.

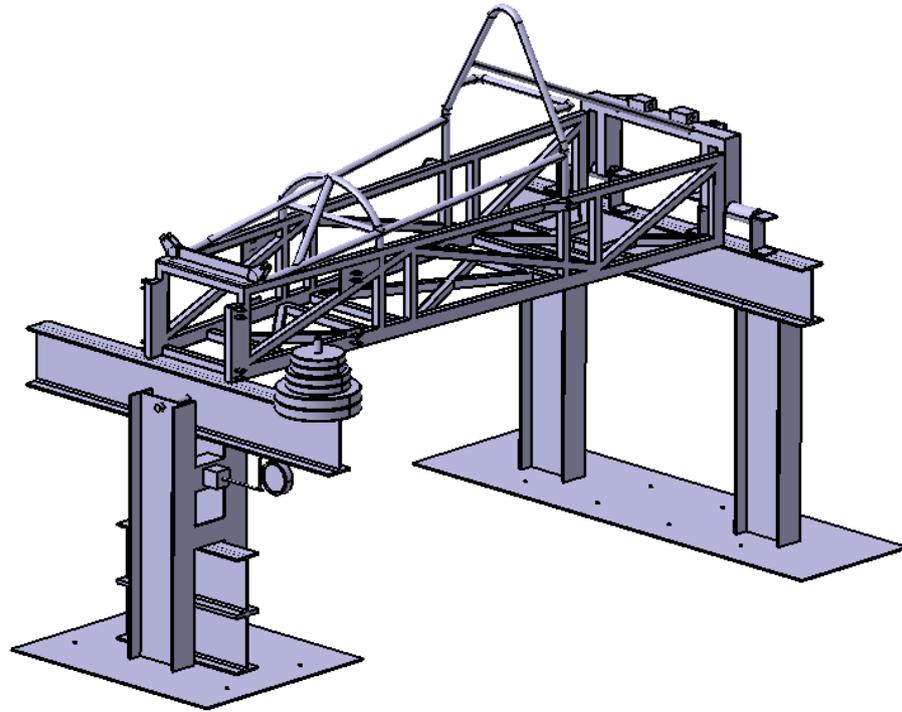


Figura 65 - Arranjo final da bancada de teste de rigidez torcional.

A seguir as figuras 66, 67 e 68 são utilizadas para expor as imagens reais da construção física da bancada para a realização do teste com e sem o chassi instalado nela, nas vistas: isométrica dianteira, isométrica traseira e lateral com o chassi real fixado a ela disposto a ser realizada a análise de sua rigidez torcional.



Figura 66 - Vista isométrica dianteira real da bancada.



Figura 67 - Vista isométrica traseira real da bancada.



Figura 68 - Vista lateral da bancada com real instalado a ela.

Para assegurar que a bancada não se movesse quando submetido o torque no chassi, a mesma fora fixada ao chão utilizando parafusos chumbadores do tipo *Parabolt*,

A figura 69 ilustra o tipo de parafuso utilizado bem como as fixações da bancada.



Figura 69 - Parafuso utilizada para fixar firmemente a estrutura ao solo.

A seguir as figuras 70 e 71 ilustram a posição dos doze parafusos do tipo *Parabolt* utilizados para a fixação de ambas as partes da bancada de teste.



Figura 70 - Ilustração da fixação da parte dianteira da bancada ao solo.



Figura 71 - Ilustração da fixação da parte traseira da bancada ao solo.

A seguir na figura 72 é ilustrado o mancal juntamente ao eixo que serve de rótula à barra rígida do aparato da bancada de medição de rigidez torcional.



Figura 72 - Ilustração da rótula da viga rígida.

Com relação a fixação do chassi à bancada, na intenção de mais se aproximar do que fora realizado na análise via *software*, a dianteira do chassi fora soldada utilizando cantoneiras de 50x50mm com 3mm de parede de forma que o binário criado pelo carga ao aplicada localizasse no centro dos pinos da abas de fixação da suspensão dianteira.

A figura 73 ilustra essa fixação abaixo.



Figura 73 - Fixação do quadro dianteiro do chassi à viga rígida.

Para a parte traseira do chassi, foram utilizadas pares de recorte da mesma cantoneira usada na fixação da parte dianteira do chassi, na fixação do quadro da suspensão traseira do chassi, de modo que o mesmo estivesse engastado conforme a análise virtual realizada.

A figura 74 ilustra a fixação traseira abaixo.



Figura 74 - Fixação do quadro traseiro do chassi à bancada.

9.5. RESULTADOS DA ANÁLISE FÍSICA DA RIGIDEZ TORCIONAL

Seguida a metodologia apresentada na seção anterior, a carga de 800N a 0,588m da rótula da barra rígida, fora aplicada de forma gradual usando como suporte uma plataforma pantográfica móvel, a intensão foi de não promover um deslocamento proveniente da aceleração da soltura do conjunto de anilhas, o que interferiria nos resultados obtidos.

A figura 75 ilustra a plataforma utilizada abaixo.



Figura 75 - Plataforma pantográfica utilizada.

Todos os ciclos realizados para a medição seguiram os passos abaixo listados:

- A bancada deve estar devidamente nivelado através do uso de dispositivo indicado e também previamente carregada e apoiada pela plataforma pantográfica, de acordo com as figura 76 e 77.



Figura 76 - Posição inicial nivelada do teste a ser realizado.



Figura 77 - Detalhe do equipamento utilizado para nivelamento

- O relógio comparador deve ser zerado para que nova medida possa ser realizada, conforme a figura 78 abaixo;



Figura 78 - Relógio comparador na marca zero.

- Garantir a aplicação gradual do carregamento através da liberação da pressão hidráulica da plataforma pantográfica, de acordo com a figura 79 a seguir.



Figura 79 - Detalhe do controle da liberação da carga.

- Retirada da plataforma pantográfica, conforme ilustra as figuras 80 e 81 abaixo;



Figura 80 – Detalhe da bancada carregada sem o apoio da plataforma.



Figura 81 – Detalhe da indicação do medidor de nível de como o chassi torceu.

- O último passo é a medição do deslocamento linear proveniente da leitura do relógio comparador, como ilustra a figura 82 abaixo;



Figura 82 - Indicação de deslocamento fornecido pelo relógio comparador utilizado.

O resultado de maior repetitividade da deslocamento linear no ponto do relógio comparador, foi o demonstrado acima na figura 82, sendo assim o valor medido de deslocamento linear no ponto de aplicação do relógio comparador é de 1,20mm.

Contudo, o valor de deslocamento linear referente à fixação do chassi à barra rígida do equipamento utilizado, é a medida a ser utilizada como o deslocamento linear a ser submetido na formulação para a rigidez torcional. Por isso, através do uso do diagrama 3 mostrado a seguir, a formulação fora desenvolvida.

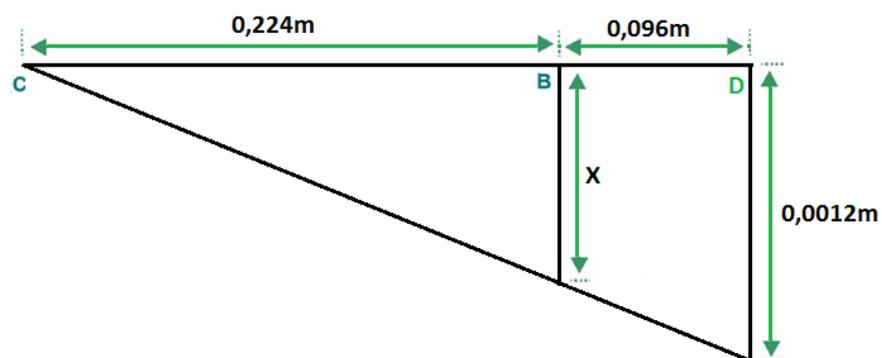


Diagrama 3 – Diagrama utilizado para chegar no valor de deslocamento do chassi.

O diagrama acima representa a barra rígida em função da aplicação da carga, considerando os pontos de interesse.

Onde:

C = rótula da viga rígida;

B = Representação dos pontos de fixação da suspensão dianteira esquerda no chassi;

D = Representa o ponto onde o relógio comparador mensura o deslocamento linear da viga rígida;

X = Representa o deslocamento linear para a formulação da rigidez do chassi em função da posição das fixações da suspensão dianteira esquerda do chassi.

Através da leitura do diagrama 2, e usando recurso da semelhança de triângulo é possível converter o deslocamento linear registrado na posição de medida do relógio comparador(D) para o ponto de fixação do chassi à barra rígida (B), a ser utilizada na equação 16. A formulação da semelhança de triângulo do diagrama 2 é demonstrada abaixo:

$$\frac{0,0012}{0,32} = \frac{X}{0,224} \quad \therefore \quad X = 0,00084m \quad [19]$$

O deslocamento linear da viga rígida registrado no ponto de medida do relógio comparador de 0,0012m é proporcional a um deslocamento linear no ponto de interesse B igual a 0,00084m. Esse valor será o deslocamento utilizado na formulação da rigidez da estrutura real do chassi.

A consideração acima é válida pois a viga é rígida e portanto descreve uma única inclinação após a aplicação da carga que se transforma em um binário puro em função do braço de alavanca associado.

9.5.1. CÁLCULO DA RIGIDEZ TORCIONAL VIA TESTE FÍSICO

Através da formulação demonstrada na seção 9.1 culminando na equação 16. A tabela 4 a seguir revela os valores das incógnitas a serem substituídas na equação da rigidez torcional considera para o teste real.

Incógnitas para K_t	
P	800N
L₁	0,448m
L₂	0,588m
Δ	0,00084m

Tabela 4 – Valores das incógnitas a saber o valor de K_t .

Dessa forma é possível calcular o valor da rigidez torcional de acordo com a formulação a seguir:

$$K_t = \frac{P * L_2}{\tan^{-1} \left[\frac{2 * \Delta}{L_1} \right]} \quad [16]$$

$$K_t = \frac{800 * 0,588}{\tan^{-1} \left[\frac{2 * 0,00084}{0,448} \right]} \quad \therefore \quad K_t = 2189,35 \pm 3 \text{ Nm/}^\circ \quad [20]$$

A equação 20 nos revela que o valor da rigidez torcional do chassi medida através da bancada física de experimento é de 2189,35Nm/deg. A variação de 3Nm/deg é demonstrado no anexo 4 no final do trabalho. No próximo capítulo será comparada a medida encontrada via *software* como o resultado alcançado pelo uso da bancada física experimental.

10. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE RIGIDEZ TORCIONAL

Os resultados da rigidez torcional do chassi do veículo objeto de estudo, obtidos pelo uso dos Métodos de Elementos Finitos e experimentalmente pelo uso da bancada, equações 13 e 20, como esperado possuem entre eles uma pequena diferença do valor encontrado. A formulação abaixo quantifica o erro associado (E.R) em percentil dos valores de rigidez encontrados, tomando como referência a rigidez torcional calculada via *software*, a equação 21 abaixo expõe o percentual de erro;

$$K_{t_{software}} = 2317,98 Nm/^\circ \quad [13]$$

$$K_{t_{experimental}} = 2189,35 \pm 3 Nm/^\circ \quad [20]$$

$$E.R = \frac{|K_{t_{experimental}} - K_{t_{software}}|}{K_{t_{software}}} \quad \therefore \quad E.R = 5,55\% \quad [21]$$

A equação 21 revela que a diferença real para a do modelo 3D, referente ao valor de rigidez torcional é de 5,55%, que de acordo com o observado no trabalho de referencia “Projeto, Análise e Teste de um Chassi de Veículo de Fórmula SAE “de (RILEY e GEORGE, 2002), mostra que a metodologia utilizada para o cálculo em âmbito virtual é correta e portanto considerada válida. De acordo com isso, as demais análises também podem ser consideradas aceitas.

Ao final deste trabalho, no anexo 4 será exposto o erro instrumental considerado para o valor da rigidez torcional da estrutura do chassi na análise física realizada pela bancada de teste.

Contudo, o que pode explicar a diferença dos valores encontrados referentes à rigidez torcional (K_t) do chassi, tem como base o fato do ambiente virtual não conter falhas de construção, como imperfeições na solda ou no próprio material que constitui o chassi, bem como no caso do modelo 3D haver uma alta precisão com relação aos

pontos das aplicações dos esforços e restrições, o que na realidade é muito difícil de se obter no modelo físico.

11. MOLDELOS PROPOSTOS PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DO CHASSI

Como as análises realizadas em ambiente virtual são consideradas válidas, este capítulo tem como objetivo expor os modelos das variações do chassi em prol da melhoria da qualidade do desempenho referente à rigidez torcional de sua estrutura. Submetendo os às mesmas análises estruturais realizadas anteriormente nos capítulos 7 e 8, seguindo as mesmas condições limites (*Boundery Conditions*) utilizadas em todas as análises realizadas, de forma a atender integralmente aos requisitos impostos.

Vale salientar que todas as alterações foram realizadas analisando o fator do custo/benefício, ou seja, são mudanças factíveis que levam basicamente em consideração a possibilidade de fabricação e os impactos que tais alterações criam na estrutura, delimitadas pelo custo que gerar de forma hipotética.

Para referência gráfica com relação as mudanças sofridas pelo chassi, abaixo nas figuras 82 a 84 é ilustrado o layout da versão inicial do chassi em três vistas diferentes.

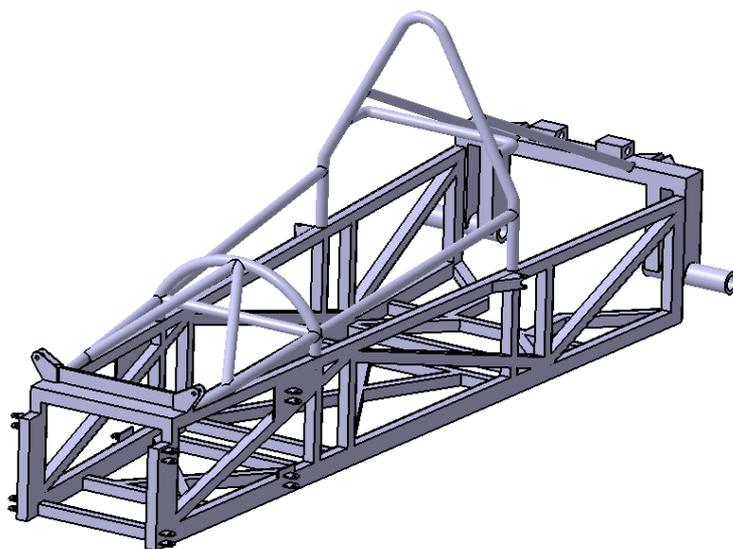


Figura 83 – Vista isométrica dianteira do chassi versão inicial.

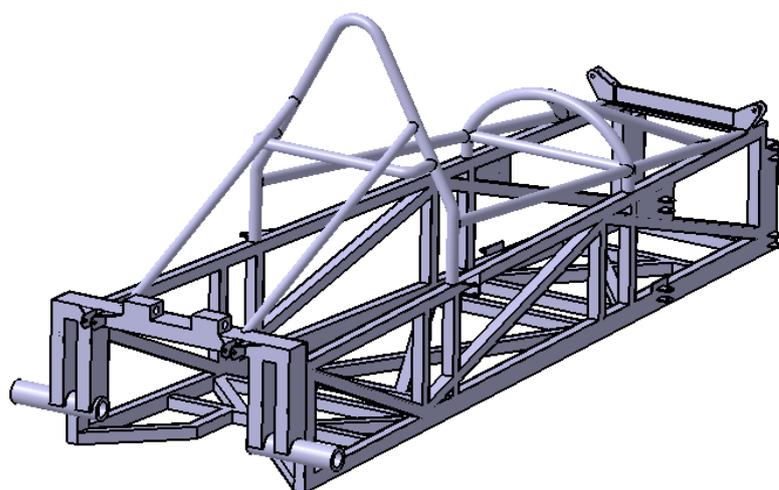


Figura 84 - Vista isométrica traseira do chassi versão inicial.

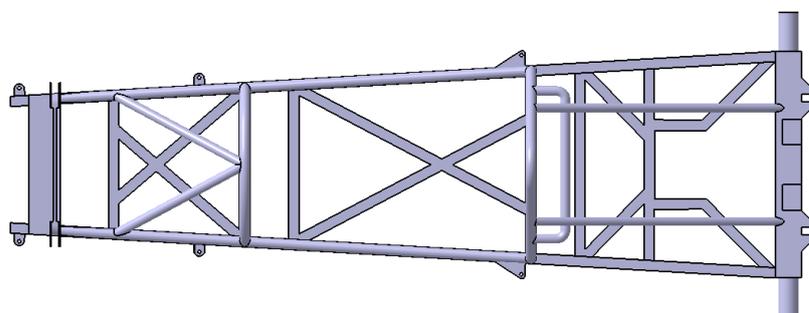


Figura 85 - Vista isométrica superior do chassi versão inicial

Considerando os resultados encontrados do chassi na sua forma inicial, em seguida na tabela 5 é apresentado um compilado de todas as análises realizadas nos

capítulos 7 e 8. Esses valores serão comparados aos resultados obtidos pelas demais configurações do chassi a serem apresentadas nesse capítulo.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Chassi versão inicial	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín=0,0011034MPa; máx=93,231MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: de 1.7884 a 15.
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,013234MPa; máx=642,34MPa.
		Tempo de vida: no $\sigma_{máx}$, Vida << a 1000 ciclos, restante é infinita.
		Fator de segurança: fator << 1 no $\sigma_{máx}$, restante acima de 5.
	Análise Modal	1a Frequência natural (fundamental) ocorre a 60,229Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 79,831Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 129,18Hz.
	C.G	(0; 1260,623mm; 203,447mm) - [X,Y,Z].
	Massa	96,859kg
	Rigidez	$K_t = 2317,98\text{Nm/deg.}$

Tabela 5 – Dados de todas as análises estruturais compilados realizadas na versão inicial do chassi.

De posse das imagens exibidas nas figuras de 82 a 84 com as vistas: isométrica dianteira e traseira bem como a vista superior do chassi original. No decorrer desse capítulo será possível observar as alterações realizadas pelos diversos travamentos submetidos ao modelo original, auxiliado pelos dados da tabela 5 com as informações das análises previamente realizadas.

11.1. DESEMPENHO DA PRIMEIRA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO

Segundo o objetivo proposto de melhoria da qualidade da rigidez torcional da estrutura do veículo objeto de estudo, em pose das tensões e dos modos de vibração que o chassi experimenta, conhecidos através das análises realizadas, foram adicionadas barras de travamentos ao chassi original.

Como mencionado na seção 5.1 o material constituinte do chassi é o AISI SAE 1020. Segundo o trecho retirado da tabela A-20 do livro Projetos de Engenharia

Mecânica de Joseh E. Shigley (2004), o valor considerado da resistência ao escoamento desse material é de 390MPa. Isso quer dizer que se as tensões suportadas pelo chassi forem inferiores a esse valor limite a estrutura trabalhará em regime elástico, do contrário ela plastificará.

Observando a tabela 5, como ponto de origem para as análises posteriores. Na sub análise da flexo torção o limite de escoamento do material fora excedido, o que acarretará numa falha da estrutura na região onde a tensão equivalente suportada registra valor igual a 642,34MPa. Além dessa falha o modelo não atende ao intervalo imposto de frequências naturais da estrutura que deve ser maior de 100Hz, como discutido na seção 7.3.3.1.

- Adição de duas barras de travamento no arco central, uma retangular seguindo padrão do chassi original e outra tubular que interliga o assoalho ao arco central na altura máxima das laterais do chassi, contribuindo assim no aumento da rigidez lateral do estrutura;
- Mudança da posição das barras superiores traseiras, assumindo uma posição mais aberta com a adição de um duplo travamento para melhorar a rigidez da região de montagem do motor no chassi;
- Adição de duas barras nas laterais traseiras Estas barras aumentam a rigidez do arco central da estrutura ao quadro das suspensão traseiras modificando a rigidez da estrutura;
- Adição de dois recortes em formato de triângulo nas extremidades mais abaixo da parte traseira do chassi. Nessa região fora detectada uma tensão equivalente que excedia ao limite de escoamento do material, a razão disso está principalmente na mudança de geometria que propicia um acúmulo de tensão na região.

A seguir as figuras 85 a 87 ilustram de forma destacada as barras de travamentos aplicadas ao chassi em sua versão inicial. Tais travamentos foram considerados pela observação dos pontos de maiores tensões equivalentes suportados pelo chassi e de seus modos de vibração, na intenção de atenderem aos requisitos do material e ao intervalo de frequência desejado.

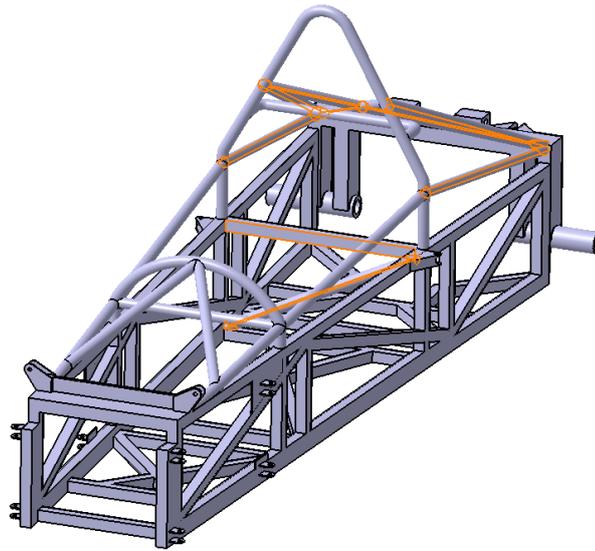


Figura 86 –Destaques das barras de travamento adicionadas à versão inicial do chassi.

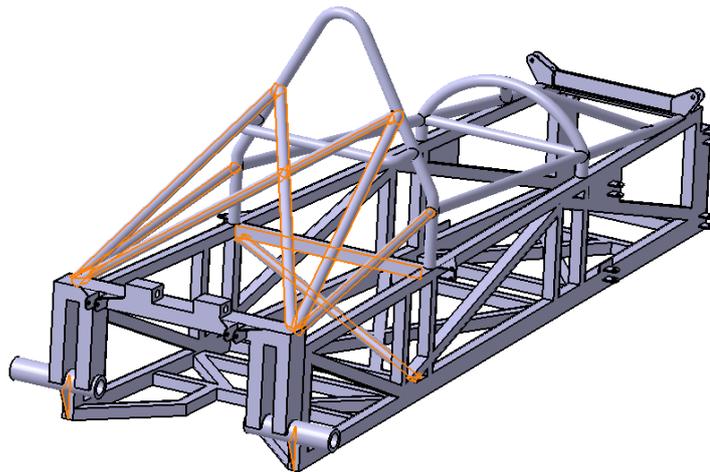


Figura 87 - Barras de travamento adicionadas à versão inicial do chassi.

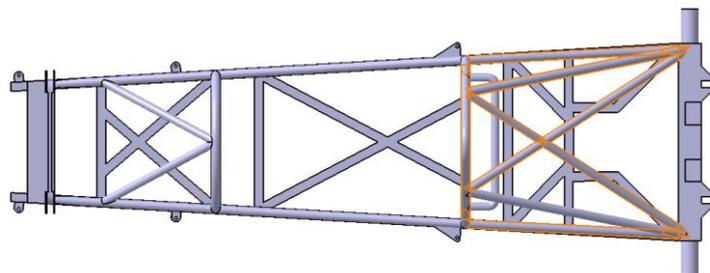


Figura 88 – Vista superior com destaques das barras adicionadas a versão do chassi inicial.

Abaixo, na tabela 6, é exibido os resultados das análises estruturais do chassi considerando a primeira alteração realizada pelo uso de travamentos, seguindo exatamente as mesmas análises realizadas no chassi original com todas as condições que limitam todas as sub análises encontradas nos capítulos 7 e 8.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Chassi com Reforço #1	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín=0,006MPa; máx=97,3MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: 1,7136 a 15.
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,01085MPa; máx=463,27MPa.
		Tempo de vida: no $\sigma_{máx}$ vida=6000 ciclos, restante infinita.
		Fator de segurança: no $\sigma_{máx}$, fator=0,35991, restante acima de 5.
	Análise Modal	1a Frequência natural (Fundamental) ocorre a 68,618Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 130,03Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 164,75Hz.
	C.G	(0,0009498mm; 1304,948mm; 221,369mm) - [X,Y,Z]
	Massa	102,046Kg
Rigidez	$K_t = 3187,76\text{Nm/deg.}$	

Tabela 6 - Dados de todas as análises estruturais compilados realizadas na versão inicial reforçada 1.

Pela leitura dos dados disponíveis na tabela 6 acima, é possível observar que as mudanças realizadas no chassi nessa primeira versão contribuiriam para a melhora da qualidade estrutural se comparados aos dados de referência da tabela 5.

As tensões equivalentes na sub análise que considera a aplicação do peso estático (análise estática) a máxima tensão registrada obteve aumento de 4,36%, isso em razão das barras superiores traseiras terem aumentado a rigidez da região do motor, contudo, como o quadro das suspensões traseiras é aberto em baixo, nessa condição estrutural ele é mais solicitado. Registrando assim essa tensão mais elevada.

Já na análise considerando esforços dinâmicos (análise de flexo-torção), a tensão máxima antes registrada no modelo inicial obteve redução de 27,87%, contudo o valor absoluto ainda excede o limite de escoamento do material. A região dessa tensão excedente permanece no mesmo local no modelo inicial, o que revela que o recorte triangular não fora efetivo.

A nova análise dos modos de vibração da primeira versão reforçada do chassi, considerando que a estrutura inicial possuía duas frequências naturais dentro do intervalo estipulado, apresenta apenas uma frequência natural, a frequência fundamental registrada a 68,618Hz, contra 60,229Hz da versão de referência.

Tratando dos tempo de vida e fatores de segurança, as melhora foram singela, em relação à massa adicionada à versão inicial foi de 5,187Kg. O valor de rigidez torcional do chassi subiu de 2317,98Nm/deg para 3187,76Nm/deg, ou seja aumento de 37,52%.

Mesmo com as melhoras reveladas, o chassi ainda não cumpre com os requisitos estipulados de resistência do material e dos modos de vibração, sendo assim se faz necessário uma segunda versão reforçada.

11.2. DESEMPENHO DA SEGUNDA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO

Como os resultados das análises estruturais da primeira versão reforçada do chassi revela o não cumprimento aos requisitos estipulados, a segunda versão fora criada na intenção de fornecer um melhor rendimento à estrutura do chassi analisado.

Para essa versão a alteração realizada fora o fechamento do quadro das suspensões traseiras. Na primeira versão reforçada o quadro traseiro obteve um maior esforço considerando apenas o peso estático apresentando assim uma tensão equivalente na análise de flexo-torção que excedeu ao limite de escoamento do material, novamente na região que liga o quadro traseiro às laterais do corpo do chassi. Em razão disso fora fechado quadro traseiro somado às alterações realizadas na primeira versão reforçada do chassi.

A seguir as figuras 88 a 90 ilustram de forma destacada a região do fechamento do quadro das suspensões traseiras do modelo analisado.

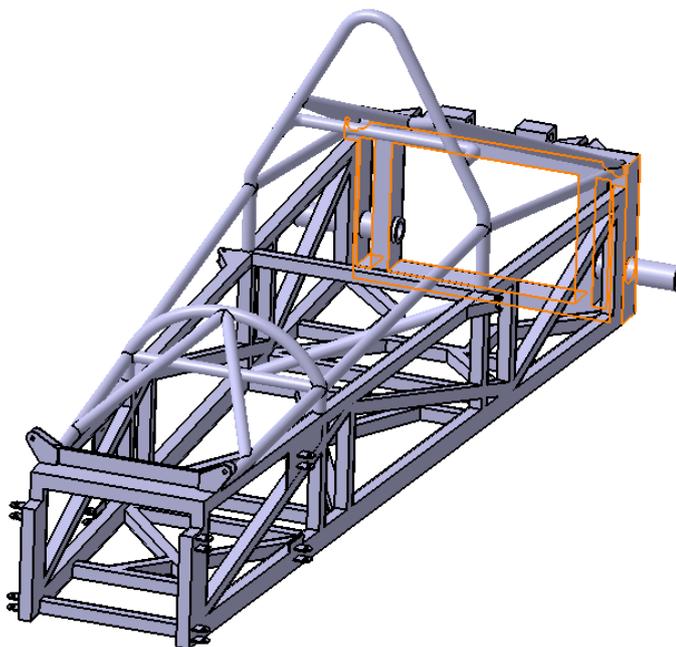


Figura 89 - Destaques das barras de travamento adicionadas à versão reforçada 1 do chassi original.

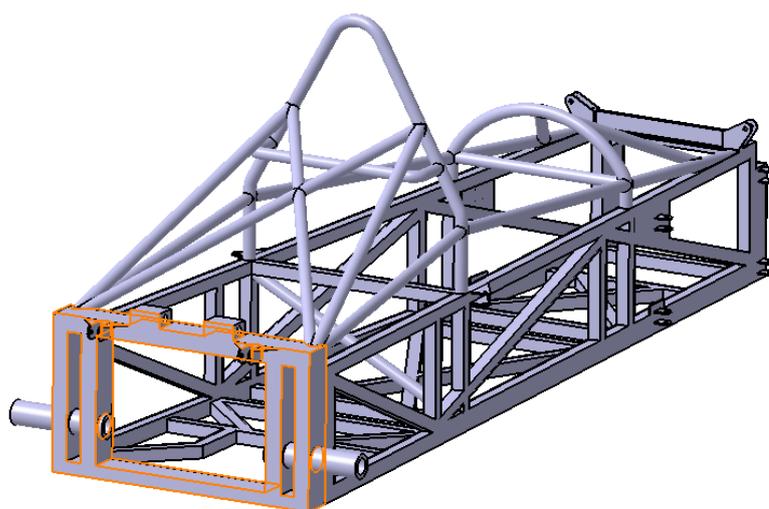


Figura 90 - Barras de travamento adicionadas à versão reforçada 1 do chassi original.

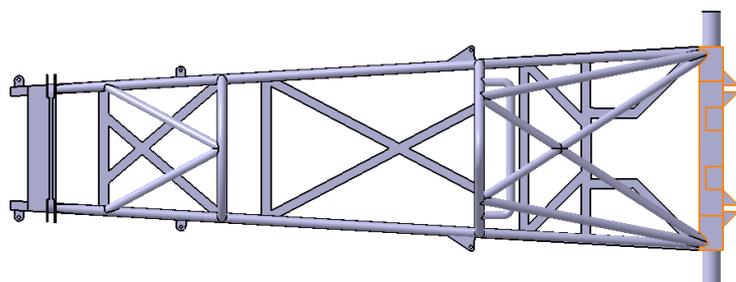


Figura 91 – Vista superior destacando os travamentos adicionados à versão reforçada 1 do chassi original.

A seguir na tabela 7 é demonstrado os resultados obtidos nas análises estruturais submetidas ao modelo original, agora aplicadas à segunda versão reforçada do chassi analisado.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Chassi com Reforço #2	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín= 0,00053MPa; máx=86,655MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: 1,9241 a 15,
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,013702MPa; máx=385,8MPa
		Tempo de vida: no $\sigma_{máx}$ vida= 79618 ciclos, restante infinita
		Fator de segurança: acima de 5, até 15.
	Análise Modal	1a Frequência natural (Fundamental) ocorre a 68,413Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 133,48Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 164,96Hz.
	C.G	(0,0009329mm; 1344,029mm; 213,565mm) - [X,Y,Z]
Massa	104,633Kg.	
Rigidez	$K_t = 3283,74Nm/deg.$	

Tabela 7 - Dados de todas as análises estruturais compilados realizadas na versão inicial reforçada 2.

Comparando os resultados dispostos na tabela 7 acima, com os da tabela 5 referente aos valores base apresentados pela estrutura analisada. A nova configuração do chassi apresentou melhoras significativas em função do fechamento do quadro traseiro.

Os valores de máximas tensões equivalentes considerando o peso estáticos do veículo, bem como as tensões na análise de flexo-torção, obtiveram redução de 7,14% e 39,93% respectivamente, considerando o modelo inicial. Se comparado os valores da segunda à primeira versão reforçada a redução passa a 10,94% de redução das máximas tensões equivalentes na análise estática realizada e uma redução de 16,78% das tensões na análise de flexo-torção.

A segunda versão reforçada do chassi, assim como a primeira apresenta apenas a frequência fundamental dentro do intervalo de interesse, saindo de 60,229Hz da versão inicial para 68,413Hz. Contudo nessa configuração comparada a primeira versão reforçada apresentada, a frequência fundamental caiu 0,205Hz,

praticamente mantendo o valor da excitação. A razão disso é pelo aumento da rigidez da parte traseira do chassi o que fez a parte central ser mais solicitada

Os tempo de vida e fatores de segurança obtiveram uma pequena melhora, com relação à massa adicionada à versão inicial foi de 7,777Kg. O valor de rigidez torcional do chassi passou a 3283,74Nm/deg, ou 41,66% de aumento com relação à versão inicial do chassi.

Mesmo que a presente versão trabalhe dentro do regime elástico, a menor frequência pertence ao intervalo estipulado e em função disso uma terceira versão reforçada do chassi será proposta na intensão de fazer a estrutura atender aos requisitos estipulados de resistência e aos modos de como o chassi vibra.

11.3. DESEMPENHO DA TERCEIRA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO

A segunda versão reforçada do chassi cumpre ao requisito referente a resistência do material, contudo, com relação as frequências de excitação ainda não.

Através dos resultados obtidos na versão reforçada anterior, constatou se que a região que atualmente possui menor frequência de excitação é a porção central do chassi. Isso em razão do aumento da rigidez de sua parte traseira, associada a já elevada rigidez da parte dianteira, o que torna seu centro mais solicitado.

Pensando nisso, para a terceira versão reforçada do chassi foram adicionados travamentos no arco da direção e no arco central do chassi. Dessa forma é esperado que a unidade central da estrutura possa ter um aumento de sua rigidez, bem como de todo chassi.

As figuras 91 a 93, ilustram em destaque as barras de travamento adicionadas a estrutura conjuntamente às realizadas na segunda versão reforçada do chassi em análise.

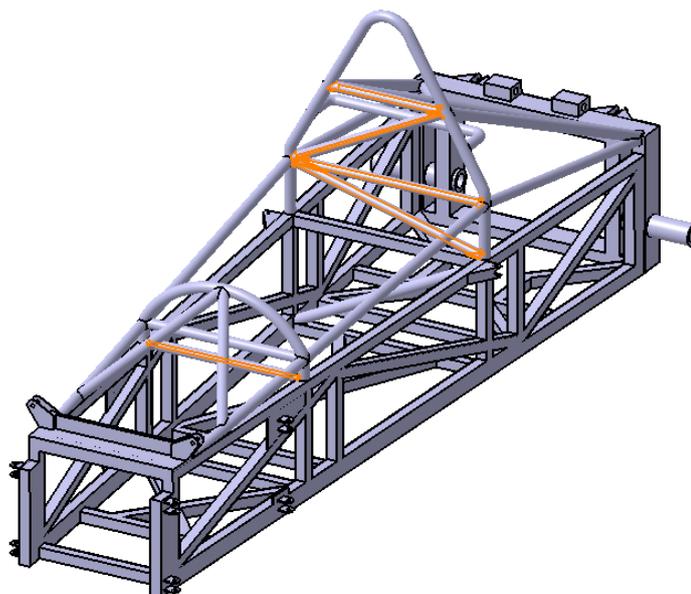


Figura 92- Destaques das barras de travamento adicionadas à versão reforçada 2 do chassi original.

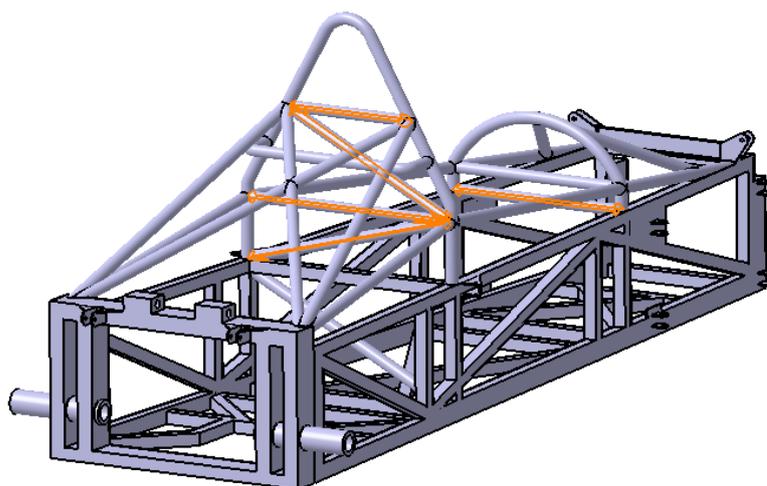


Figura 93 - Barras de travamento adicionadas à versão reforçada 2 do chassi original.

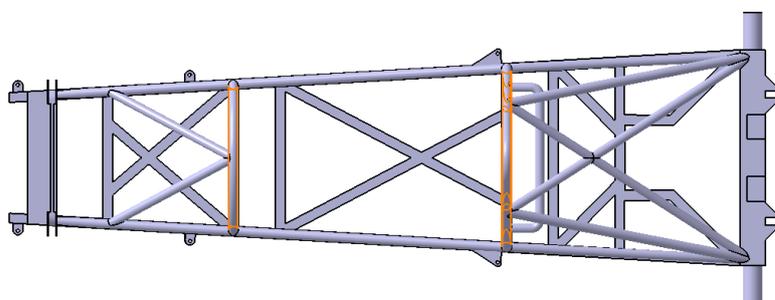


Figura 94 - Vista superior dos travamentos adicionados à versão reforçada 2 do chassi original.

Abaixo na tabela 8 é mostrado os resultados das análises estruturais realizadas na terceira versão reforçada seguindo exatamente os modelos de análise feitos com a estrutura inicial.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Chassi com Reforço #3	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín=0,00030375MPa, máx=87,65MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: 2,12 a 15
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,014424MPa, máx=249,6MPa
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: acima de 5, até 15.
	Análise Modal	1a Frequência natural (Fundamental) ocorre a 75,559Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 156,62Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 172,76Hz.
	C.G	(0,51mm; 1344,349mm; 229,282mm) -[X,Y,Z]
	Massa	108,597kg
Rigidez	$K_t = 3720,08\text{Nm/deg.}$	

Tabela 8 - Dados de todas as análises estruturais compilados realizadas na versão inicial reforçada 3.

Da tabela 8 é compreendido que na análise estática, o valor das máximas tensões equivalentes suportadas pela estrutura com relação a versão inicial, representa uma diminuição de 5,98%, já comparadas à segunda versão reforçada houve um aumento de 1,13% decorrente da maior rigidez dos arcos que causaram um esforço maior na fixação dos amortecedores traseiros, local da aplicação da restrição do tipo suporte cilíndrico.

Na análise de flexo-torção, os valores de máximas tensões equivalentes tiveram uma redução de 61,14% com relação à versão inicial e 35,3% em comparação à segunda versão reforçada proposta.

Para a análise dos modos de vibração a terceira versão reforçada também possui apenas a frequência fundamental dentro do intervalo de vibração de interesse, saindo dos 60,229Hz da versão inicial para 75,559Hz. Comparada à versão reforçada apresentada anteriormente, revela uma frequência de 7,146Hz a mais no primeiro modo decorrente do aumento da rigidez pelo uso dos travamentos nos arcos da estrutura.

As análises dos tempo de vida e dos fatores de segurança pouco melhoraram, com relação ao incremento de massa metálica o adicional à versão inicial foi de 11,73Kg. O valor de rigidez torcional do chassi agora registrado é igual a 3720,08Nm/deg, o que representa 60,5% do aumento da rigidez torcional com relação à versão inicial do chassi.

Assim como a segunda versão reforçada, a atual terceira não cumpre integralmente com os requisitos impostos a estrutura do veículo, por isso será realizada a quarta versão.

11.4. DESEMPENHO DA QUARTA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO

Os resultados até aqui expostos, revela que o vão conhecido como *cockpit*, ou habitáculo do piloto é a região mais sensível às mais baixas frequências de excitação da estrutura vibrando livremente. Na terceira versão reforçada do chassi fora aumentada a rigidez do arco da direção e do arco central do chassi, o que melhorou a rigidez das partes frontal e traseira do chassi. Contudo, a região central por conter um grande espaço vazio, vazio esse que deve ser ocupado pelo piloto, é suscetível às menores frequências registradas.

Para a quarta versão reforçada, a área do habitáculo do piloto será tratada sua rigidez com o uso de barras de travamento associados as da terceira versão reforçada, que além de propiciar melhor rigidez à região também criam uma espécie de célula de segurança ao piloto em eventuais colisões que possam ocorrer. Essa barras fazem uso da maior rigidez dos arcos de direção e central do chassi, na tentativa de permutar tal condição ao centro do veículo.

Abaixo as figuras 94 a 96 ilustram as barras de travamento destacadas na quarta versão reforçada da estrutura analisada:

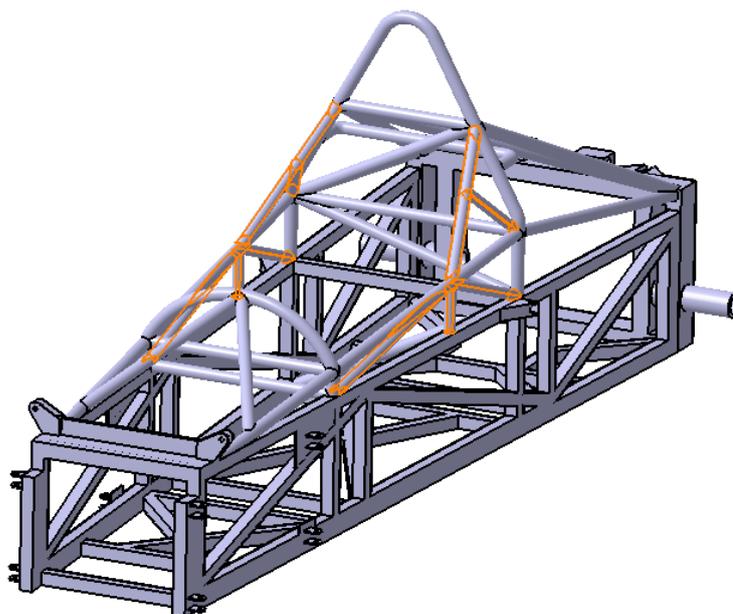


Figura 95 - Destaques das barras de travamento adicionadas à versão reforçada 3 do chassi original.

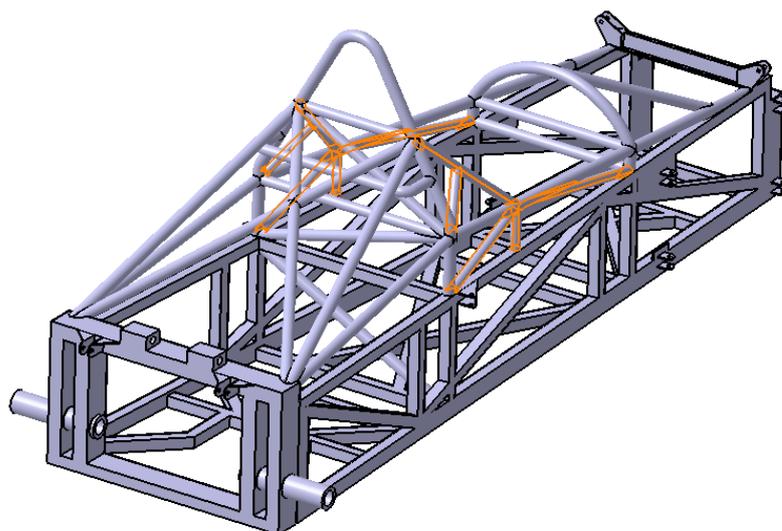


Figura 96 - Barras de travamento adicionadas à versão reforçada 3 do chassi original.

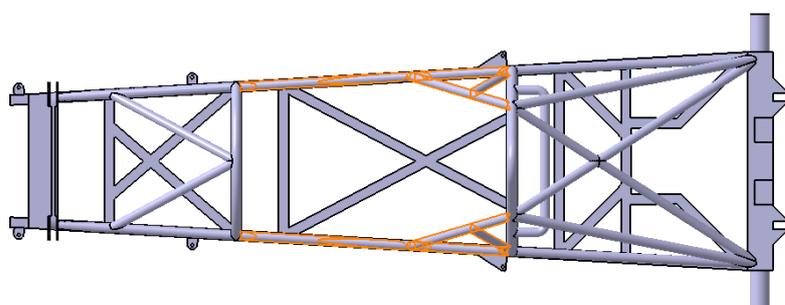


Figura 97 - Vista superior dos travamentos adicionados a versão reforçada 3 do chassi original.

A seguir na tabela 9 são expostos os resultados das análises estruturais realizadas na quarta versão reforçada utilizando as mesmas análises realizadas pela estrutura inicial e demais versões reforçadas apresentadas anteriormente.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Chassi com Reforço #4	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín=0,00018415MPa, máx=86,973MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: de 5 a 15.
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,014366MPa, máx=220,55MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: acima de 5, até 15.
	Análise Modal	1a Frequência natural (Fundamental) ocorre a 90,907Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 170,3Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 178,62Hz.
	C.G	(0,447mm; 1336,927mm; 242,503mm) - [X,Y,Z]
Massa	112,892kg	
Rigidez	$K_t = 4735,17\text{Nm/deg.}$	

Tabela 9 - Dados de todas as análises estruturais compilados realizadas na versão inicial reforçada 4.

A tabela 9 informa em comparação a tabela 5, que os valores das máximas tensões equivalentes na análise estática confere à nova versão um diminuição de 6,71% com a versão inicial e 0,77% com relação à terceira versão reforçada.

As máximas tensões equivalentes suportadas pela estrutura na análise de flexo-torção revelam redução de 65,66% com relação à versão inicial e 11,63% em relação à terceira versão reforçada apresentada.

Como nas versões anteriores, a quarta variação reforçada também apresentou apenas a frequência natural dentro da faixa compreendida de 0 a 100Hz. O valor dessa primeira excitação comparada ao modelo inicial saiu de 60,229Hz para 90,907Hz da atual versão e confrontando aos resultados da versão reforçada anterior o aumento na frequência natural foi de 15,348Hz. Esse resultado revela que a aplicação dos travamentos laterais que fazem uso da maior rigidez dos arcos na intenção de tornar o habitáculo mais rígido deu um bom resultado, contudo, ainda não apresenta frequência fundamental superior aos 100Hz.

Já análises dos tempo de vida e dos fatores de segurança, a mudança maior foram nos fatores de segurança, quantificando o incremento de massa com relação à versão inicial, a quarta versão reforçada é 16,03Kg mais pesada. Para a atual versão, o valor da rigidez torcional do chassi é de 4735,17Nm/deg, o que representa com relação à versão inicial do chassi um aumento de 104,28% de sua rigidez torcional.

A quarta versão reforçada do chassi é a que mais se aproxima da condição física que cumpro com os requisitos impostos, as tensões equivalentes estão bem abaixo do limite de escoamento do material, ou seja, estão dentro do regime elástico, contudo há um modo de vibração que permanece dentro do intervalo na qual não se deseja trabalhar. Em razão disso uma quinta variação será considerada.

11.5. DESEMPENHO DA QUINTA VERSÃO DO CHASSI COM REFORÇO

Através das análises realizadas observando o quão significativo cada uma das alterações seriadas apresentadas nas demais variações geraram. A quarta variação reforçada tem de atender ao intervalo de excitação exigido, uma vez que até o presente momento em relação a resistência de materiais o chassi vem apresentado boa performance.

Para isso a principal área de atuação a tornar o chassi apto nos requisitos impostos, é a área central do chassi que engloba o habitáculo do piloto. Essa região deve ser minuciosamente analisada, tomando em consideração os possíveis travamentos que poderão ser realizados sem abrir mão do já diminuto conforto do piloto, a somar com rigidez de todo o chassi.

Na versão anterior a sub estrutura como uma célula de segurança fora muito representativa na melhoria torcional do chassi, aumentado a em 51,04% com relação à rigidez calculada pelo chassi em sua versão inicial. Se compararmos à terceira versão, o aumento da rigidez em função da célula de segurança foi de 21,43%.

Em detrimento disso as próximas alterações serão feitas de maneira que permita o uso da alta rigidez do arco da direção e central, bem como do assoalho do

chassi, a tornar a rigidez do habitáculo tão maior quanto seja necessário a cumprir os requisitos impostos à estrutura.

Abaixo as figuras 97 a 99, ilustram de forma destaca as barras de travamento inseridas à estrutura somada as alterações realizadas na versão anterior apresentada.

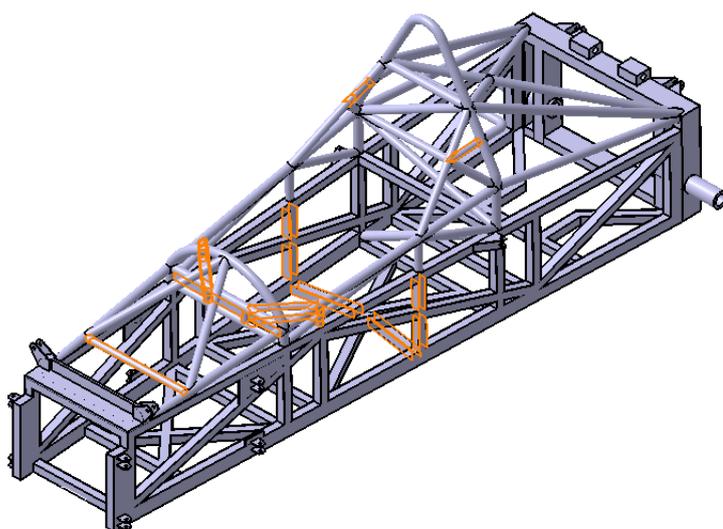


Figura 98 - Destaques das barras de travamento adicionadas à versão reforçada 4 do chassi original

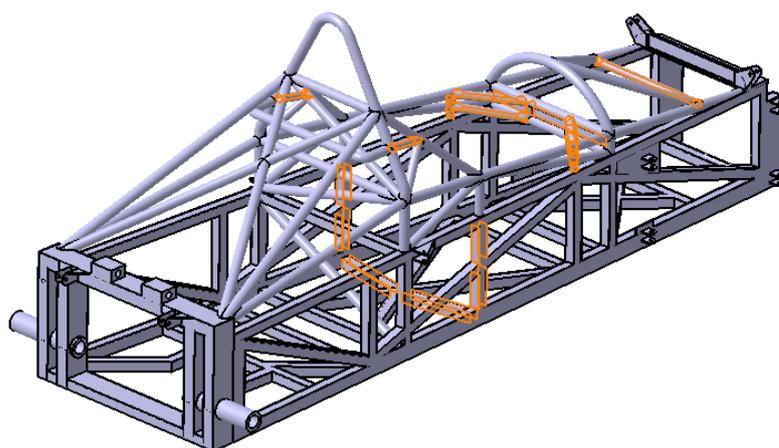


Figura 99 - Barras de travamento adicionadas à versão reforçada 4 do chassi original

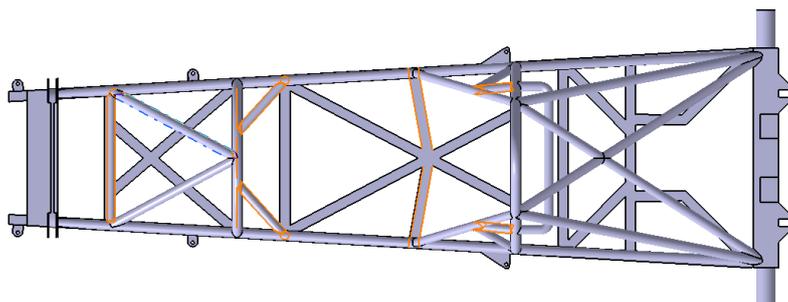


Figura 100 - Vista superior destacando as barras adicionadas a versão reforçada 4 do chassi original.

Na tabela 10 abaixo, é exibido os resultados realizados na quinta versão reforçada do chassi, que assim como nas demais versões seguiram exatamente as mesmas análises feitas na estrutura em sua versão inicial, considerando as mesmas condições limites utilizadas.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Chassi com Reforço #5	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín=0,00021982MPa, máx=79,308MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: de 5 a 15.
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,011239MPa, máx=216,16MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: acima de 5, até 15.
	Análise Modal	1a Frequência natural (Fundamental) ocorre a 103,69Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 178,28Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 188,17Hz.
	C.G	(0,453mm; 1315,245mm; 244,626mm) - [X,Y,Z]
Massa	116,547kg.	
Rigidez	$K_t = 5291,9\text{Nm/deg.}$	

Tabela 10 - Dados de todas as análises estruturais compilados realizadas na versão inicial reforçada 5.

Até o momento os níveis de máximas tensão equivalentes vêm decaindo de acordo com as alterações realizadas. Nas análises estáticas em comparação aos níveis de máximas tensões equivalentes registrados pela estrutura em sua versão inicial, o decaimento é na ordem de 14,93% e ao comparar às máximas tensões da versão anterior a redução representa 8,81%.

Em relação às máximas tensões nas análises de flexo-torção, em comparação à versão inicial a redução do valor absoluto de tensa registrado é de 66,34% e quando comparado ao resultado da versão reforçada anterior a redução é de 19,9%.

As análises dos tempo de vida e dos fatores de segurança, permanece com altos valores experimentados pelos ciclo de vida e de fatores de segurança por toda estrutura já apresentada na versão anterior. O incremento da massa do chassi com relação à versão inicial é de 19,68Kg. O valor da rigidez torcional do chassi referente a quinta versão reforçada é de 5291,9Nm/deg, representando um aumento de 128,29% da rigidez torcional com relação à versão inicial do chassi.

A quinta versão reforçada da estrutura finalmente pelo uso dos travamentos expostos nas figuras 97 a 99, atende ao requisito de excitação da estrutura, conferindo em seu primeiro modo, uma frequência fundamental superior aos 100Hz impostos, saindo dos 60,229Hz da frequência natural registrada na versão inicial do chassi para uma excitação a 103,69Hz, se comparado à versão reforçada anteriormente apresentada a frequência natural da estrutura tem valor acrescido de 12,783Hz. O que revela a eficiência dos travamentos utilizados.

Com isso, seguindo os objetivos propostos pelo trabalho de tornar a estrutura do chassi do veículo objeto de estudo, a ter uma melhor performance focada na rigidez torcional e na resistência do material constituinte. A quinta versão reforçada se mostra uma boa opção a ser utilizada na prática, uma vez que a mesma aproveita todos os componentes originais já existentes do veículo estudado, a exceção de um pequeno ajuste do conjunto de carenagens aerodinâmicas por conta dos travamentos adicionados.

12. ANÁLISE DO CHASSI ORIGINAL TODO FEITO POR BARRAS TUBULARES

Como forma de enriquecer o conhecimento adquirido pelas variâncias no formato do chassi é desejável conhecer as possíveis variações dos resultados alcançados, mudando a geometria do material original da estrutura do veículo objeto de estudo.

Nesse capítulo será feito uma versão do chassi original integralmente feito por barras tubulares ao invés de se ter uma combinação de barras retangulares e circulares, como ocorre na construção da estrutura original.

12.1. DESEMPENHO DO CHASSI ORIGINAL INTEGRALMENTE TUBULAR

Afim de manter a isonomia dos resultados alcançados, as áreas transversais das barra tubulares a serem utilizadas no novo chassi foram consideradas como tubos circunscritos nas barras retangulares alterando a espessura da parede dos mesmos, mantendo assim por igual os valores das áreas de seção transversal.

Dessa maneira, por exemplo, tomando um metro extensão de cada umas das oito seções transversais expostos na figura 100 abaixo, par a par conforme correlação apresentada na figura, possuiriam o valor de massa.

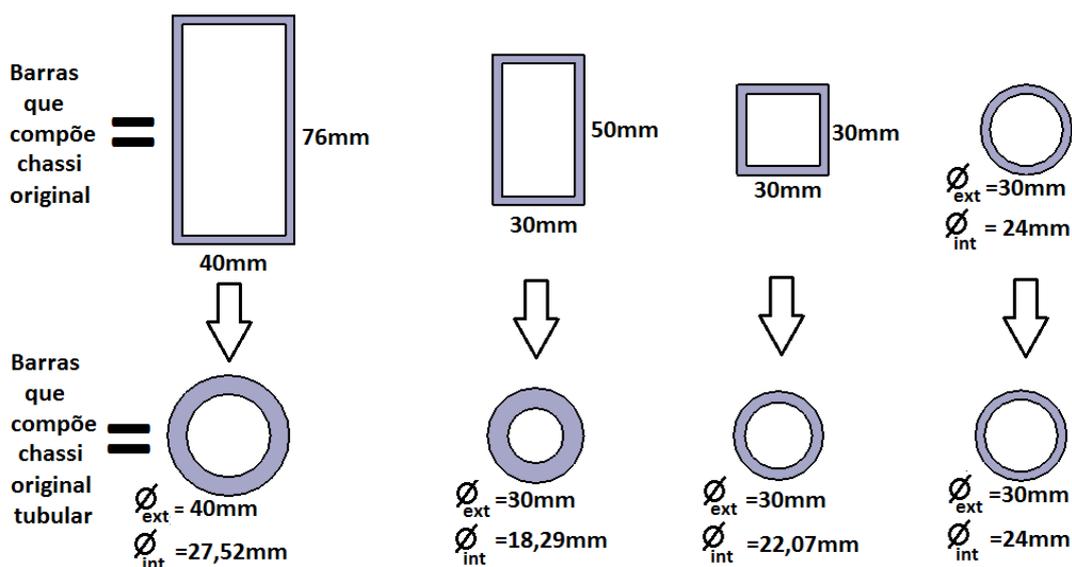


Figura 101 – Correlação das áreas transversais admitidas.

Referente às análises realizadas nessa seção, a estrutura original inteiramente confeccionada por barras circulares também será submetida às mesmas análises realizadas que consideraram as mesmas condições limites impostas à estrutura tanto na forma original, quanto em suas variações apresentadas capítulo anterior.

A seguir as figuras 101 a 103 ilustram as vistas isométricas dianteira e traseira, bem como de da vista superior do chassi seguindo desenho apresentado pelo estrutura do chassi real analisado.

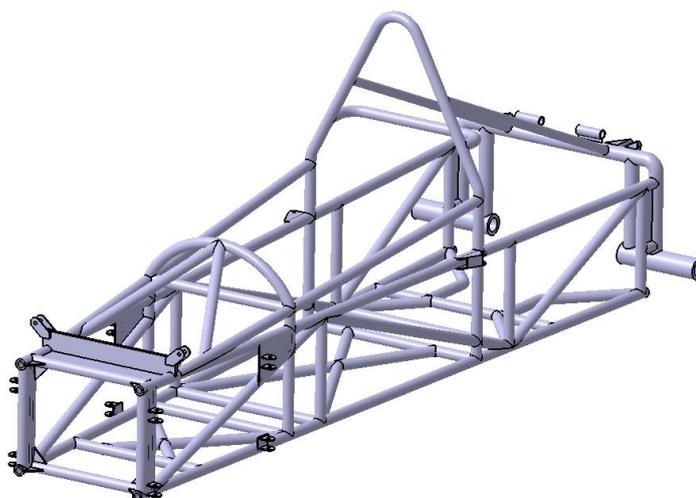


Figura 102 - Vista isométrica dianteira do chassi versão inicial integralmente tubular.

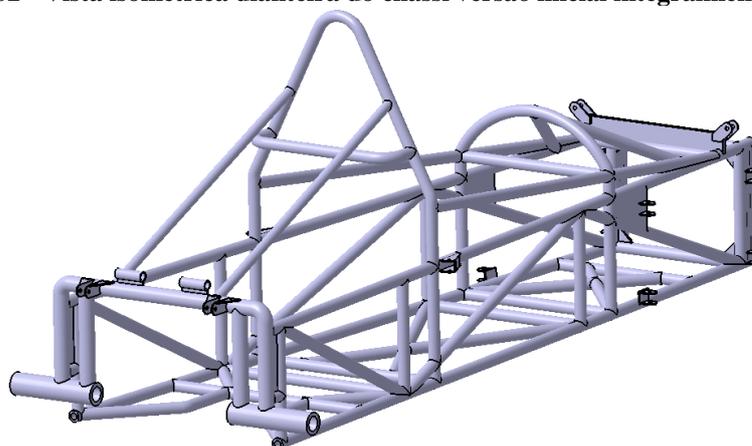


Figura 103 - Vista isométrica traseira do chassi versão inicial integralmente tubular.

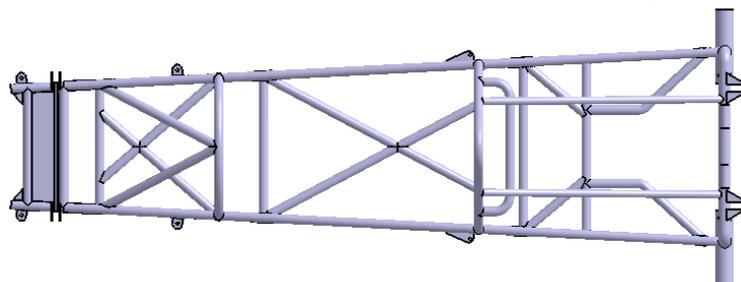


Figura 104 - Vista superior do chassi versão inicial integralmente tubular.

Abaixo na tabela 11, são expostos os resultados realizados do chassi integralmente tubular seguindo layout original. Vale lembrar que assim como todas as demais versões apresentadas do chassi, as análises realizadas seguem o mesmo raciocínio utilizando as mesmas condições limites de aplicação de forças e restrições utilizadas anteriormente.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Chassi original todo tubular	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín=0,0014696MPa, máx=88,89MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: de 1,8758 a 15.
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,01202MPa, máx=607,76MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: fator $\ll 1$ no $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$, restante acima de 5.
	Análise Modal	1a Frequência natural (Fundamental) ocorre a 65,217Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 78,07Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 119,81Hz.
	C.G	(0; 1252,527mm; 201,824mm) - [X,Y,Z]
Massa	99,511Kg.	
Rigidez	$K_t = 2407,96\text{Nm/deg.}$	

Tabela 11 - Dados das análises estruturais realizadas na versão inicial do chassi integralmente tubular.

A leitura da tabela 11 comparada à tabela 5 apresentada no capítulo 11, revela que o chassi integralmente tubular apresenta máximas tensões equivalentes quando consideradas as análises estáticas realizadas, uma redução de 4,65% em comparação ao chassi em sua forma original e considerando as máximas tensões equivalentes das análises de flexo-torsão uma redução igual a 5,38% do valor medido.

Os análises dos tempo de vida e dos fatores de segurança, assim como na versão original do chassi, a integralmente tubular seguindo seu layout também contém baixos valores de ciclos e coeficientes de segurança nos mesmos pontos apresentadas nas análises do chassi original. O que era esperado, pois apresenta o mesmo problema de mudança de geometria na região de ligação do quadro das suspensões traseiras às laterais do chassi.

Mesmo considerado os mesmos valores de áreas transversal, o chassi integralmente tubular apresentou uma massa igual a 2,65Kg maior se comparado à versão original. Isso pode ser explicado pela razão de necessitar de mais metragem de barras tubulares se comparada às retangulares que possuíam dimensão se comparado ao diâmetro dos tubos circulares.

O valor da rigidez torcional do chassi integralmente tubular é de 2407,96Nm/deg, o que significa um aumento de 3,88% da rigidez torcional com relação à versão inicial do chassi.

Já confrontadas os modos de vibração da estrutura original com a integralmente tubular, a segunda apresentou também duas frequências naturais dentro do intervalo de 0 a 100Hz, sendo que a frequência fundamental vem a ocorre a 65,217Hz, um acréscimo de 4,988Hz na primeira excitação.

Os resultados aqui expostos demonstram o rendimento da estrutura integralmente tubular como sendo um pouco melhor, por mais que melhores os resultados poderiam ser considerados como um empate técnico, porém, superiores. Bem tratados os travamentos uma estrutura tubular deve alcançar resultados ainda melhores.

13 PROPOSTA FINAL DE CHASSI TUBULAR DE MAIOR RENDIMENTO

De posse dos resultados obtidos nas análises das variações que buscavam tornar o chassi original do veículo estudado a possuir um melhor rendimento de sua qualidade torcional e estrutural, associado a análise realizada no capítulo anterior onde fora considerado que uma estrutura integralmente tubular poderá a ter um melhor rendimento.

Esse capítulo tem o objetivo de criar um novo layout seguindo características básicas como medida de entre eixos, posição do motor, câmbio e posição de dirigir inalteradas.

Para esse novo chassi as seções transversais seguem os mesmos perfis demonstrados na figura 100 da seção 12.1 apresentada, cujo material constituinte permanece sendo o AISI SAE 1020, onde o limite de escoamento do material é de 390MPa.

Por conta do veículo objeto de estudo não ser participante de qualquer categoria homologada de automobilismo, a criação da nova estrutura fora norteadada na intenção de possuir um melhor rendimento estrutural limitado à resistência do material constituinte, bem como do mesmo intervalo de excitação com frequências superiores a 100Hz utilizado nas demais análises.

O objetivo final é desenvolver uma possível estrutura tão rígida quanto possa ser a garantir a boa performance do demais sub conjuntos pertencentes ao veículo como direção e suspensão, sem abrir mão do conforto e da segurança de quem pilota.

Visando o conforto e a adequação do tamanho do cockpit à várias pessoas de porte diferente, o chassi desenvolvido na região do habitáculo do piloto teve as dimensões de largura e altura um pouco alterada para melhor acomodar aquele que irá pilotar.

A parte posterior do chassi onde abriga o motor e câmbio, também a suspensão traseira fora modificada a possuir uma configuração onde não há pontos que possa ter acúmulos de tensões como ocorria na estrutura original do chassi.

A ideia é promover um chassi que possa fazer uso de grande parte das peças do veículo real. As alterações realizadas exigem mudanças apenas no conjunto da carenagem aerodinâmica, a construção dos braços inferiores das suspensões traseiras.

A seguir as figuras 104 a 106, ilustram as vistas isométricas dianteira e traseira, bem como da superior desse novo chassi proposto, a ser submetido as mesmas análises realizadas anteriormente como todas condições de contorno utilizadas.

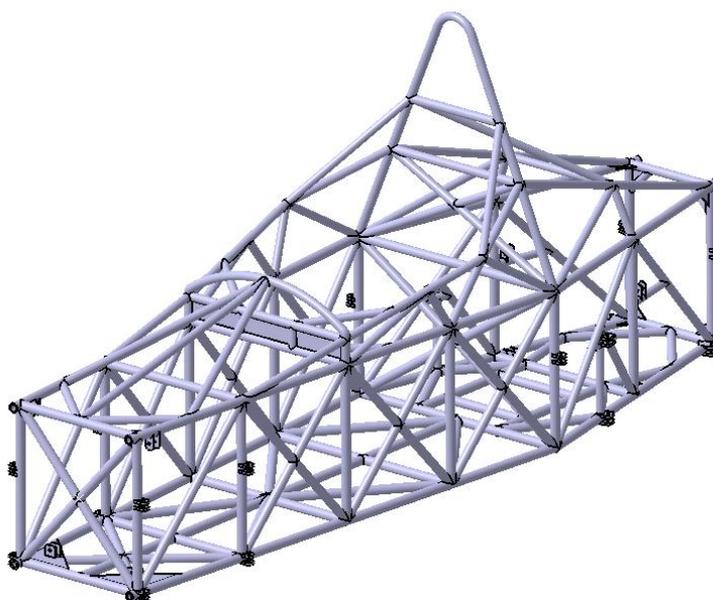


Figura 105 - Vista isométrica dianteira do novo layout chassi versão integralmente tubular.

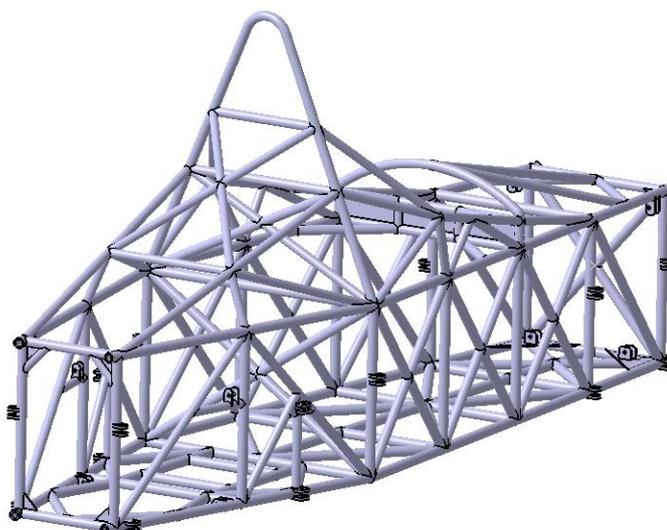


Figura 106 - Vista isométrica traseira do novo layout chassi versão integralmente tubular.

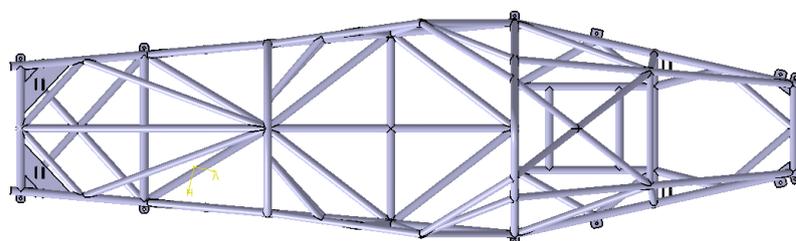


Figura 107 - Vista superior do novo layout chassi versão integralmente tubular.

Abaixo a tabela 12, expõe os resultados extraídos das análises estruturais aplicadas a o chassi tubular proposto.

Versão Chassi	Tipo de Análise	Resultados Obtidos
Proposta de chassi tubular de maior rendimento	Análise Estática	Tensões equivalentes: mín=0,0010258MPa, máx=22,862Mpa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: de 7,2931 a 15.
	Flexo-torção	Tensões equivalentes: mín=0,027603MPa, máx=203,78MPa.
		Tempo de vida: vida infinita por toda estrutura.
		Fator de segurança: de 5 a 15.
	Análise Modal	1a Frequência natural (Fundamental) ocorre a 130,05Hz.
		2a Frequência natural ocorre a 150,13Hz.
		3a Frequência natural ocorre a 160,63Hz.
	C.G	(0,169mm; 1346,392mm; 321,865mm) - [X,Y,Z]
Massa	165,337Kg.	
Rigidez	$K_t = 17018,9\text{Nm/deg.}$	

Tabela 12 - Dados das análises estruturais realizadas a nova versão do chassi integralmente tubular.

Analisando os resultados da tabela 12 é possível observar que o chassi tubular proposto nessa seção possui uma qualidade atendendo com sobra aos requisitos referentes à resistência do material constituinte, bem como do intervalo de excitação da estrutura.

Considerando os resultados das análises estáticas realizadas ao chassi em sua quinta versão reforçada apresentada no capítulo 11, por exemplo, o novo chassi possui máximas tensões equivalentes que representam uma redução de 71,17%. Considerando agora as máximas tensões equivalentes na análise de flexo-torção a redução passa a ser igual a 5,66%.

Para as análises dos tempo de vida e dos fatores de segurança, a nova estrutura apresentou os maiores valores dentre todas expostas no trabalho. Contudo pertence a ela a maior massa registrada, pesando 165,33Kg, a nova estrutura considerada é 70,69% mais pesada que o chassi da estrutura real.

Foi no valor da rigidez torcional do chassi que a nova estrutura teve seu maior ganho frente as demais, calculado 17018,9Nm/deg. Em outras palavras a estrutura proposta é extremamente rígida, quase sete vezes e meia mais rígida que a estrutura real do chassi analisado.

14. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo tem o objetivo de expor de forma clara os ganhos com relação a melhora da rigidez e da resistência das principais versão da estrutura apresentada do chassi analisado, comparando os resultados obtidos da relação rigidez por peso, rigidez torcional, massa total e custos de fabricação.

A tabela 13, ilustra a comparação direta dos principais modelos de chassi apresentados ao longo do trabalho. Para o fator custo, a versão inicial chassi será a referência cujo custo será identificado como C_0 e conforme o custo subir o número subscrito será maior.

Versão Chassi	Peso [Kg]	Rigidez torcional (K_t) [Nm/deg]	Relação K_t /peso [Nm/Kg*deg]	Custo
Chassi versão inicial	96,859Kg (Referência)	2317,98Nm/deg (Referência)	23,44Nm/Kg*deg (Referência)	C_0 (Referência)
Chassi com reforço #5	116,547Kg Representa acréscimo de 20,32% (19.688Kg) sobre o valor de referência.	5291,9Nm/deg Representa um aumento de cerca de 128,29% comparado ao valor da versão inicial.	45,4Nm/Kg*deg O que revela ser quase duas vezes maior que a relação da versão inicial.	C_1 Adição de chapas e barras e materiais consumíveis como lixas e discos de corte.
Chassi original todo tubular	99,511Kg Representa diferença de 2,73% (2,652Kg) pela mudança da geometria das barras.	2407,96Nm/deg Representa diferença de 3,88% (89,98Nm/deg) com relação ao chassi inicial.	24,19Nm/Kg*deg Praticamente igual a relação da versão inicial.	C_2 Mudança das geometrias das barras do chassi para configuração toda tubular.
Chassi tubular de maior rendimento	165,337Kg Representa diferença de 70,69% (68,478Kg) pela nova configuração apresentada.	17018,9nm/deg Comparado a versão inicial há um aumento de 634,21% da rigidez torcional.	102,93nm/Kg*deg O que revela ser 339,12% superior ao chassi inicial.	C_3 Maior utilização da quantidade de barras e de material consumível.

Tabela 13 - Comparação direta dos principais modelos de chassi apresentados.

Pela análise da tabela 13 acima, as principais versões do chassi a começar pela versão inicial, passando a quinta versão reforçada do chassi original, seguida da versão original do chassi integralmente tubular terminando na versão proposta de chassi tubular de maior rendimento é possível observar os impactos que as mudanças realizadas influenciaram aos novos valores de rigidez torcional.

Os parâmetros do peso total da estrutura, relação rigidez/peso e por fim custo de cada uma delas também podem ser observados no intuito de julgar qual versão ou

modificações apresenta uma melhor relação que leva em conta a performance da estrutura, frente a execução e o custo que cada uma delas necessita.

Dito isso, é a quinta versão reforçada oriunda da configuração original do chassi em análise, como sendo a escolha a ser executada frente ao atendimento dos requisitos impostos associado a um baixo incremento de massa, boa relação rigidez/peso a um custo razoavelmente baixo.

15. CONCLUSÃO

Em razão da estrutura do chassi do veículo objeto de estudo não atender aos requisitos impostos referentes à resistência do material constituinte e aos modos de vibração com base no intervalo de interesse, na qual a frequência fundamental do chassi deveria ser superior a 100Hz. As variações estruturais que foram consideradas, tinham como finalidade tornar a estrutura do chassi estudado atendente de maneira integral aos requisitos impostos.

As análises realizadas tiveram um papel fundamental na observância e constatação da qualidade da estrutura apresentada inicialmente para que através da implementação de barras e elementos auxiliares à estrutura do chassi, pudesse haver o aumento da sua rigidez contribuindo para uma melhor performance de rigidez torcional.

Tomando as três deformações básicas: torção longitudinal, flexão lateral e flexão vertical, e de acordo com os campos de tensões equivalentes e dos modos de vibração investigados em todas as oito diferentes configurações apresentadas da estrutura do chassi. Em todas as mesmas análises realizadas foram consideradas exatamente as mesmas condições de contorno, a razão para tal foi de possibilitar o acompanhamento dos impactos que cada alteração gerava contribuindo numa melhor compreensão de como os pacotes comerciais de análises e desenvolvimento de produto podem auxiliar o engenheiro nas tomadas de decisão, que neste trabalho o foco fora tornar a estrutura mais resistente e rígida.

Considerando as variações sobre a versão original do chassi, do universo de oito configurações expostas no trabalho, cinco foram versões reforçadas diretamente da configuração inicial (chassi real). Apenas na quinta variação de versão reforçada do chassi original que os resultados obtidos atenderam integralmente aos requisitos impostos. Com relação à versão inicial, a quinta versão apresentada possui 16,89% de incremento de massa, porém os resultados obtidos nas análises realizadas justificam esse aumento revelando a melhora substancial observada pela quinta versão reforçada. Mostrando ser uma configuração totalmente possível de ser realizada fisicamente de maneira a aproveitar quase que sem modificações as demais partes que juntas forma o veículo totalmente montado e funcional.

Em razão disso a conclusão deste trabalho é que com pequenas modificações numa estrutura pré-existente, os resultados alcançados podem melhorar substancialmente a qualidade referente à eficiência de sua rigidez torcional, fazendo a atender aos requisitos referente à resistência do material que a constitui e dos modos de vibração à frequências de excitação a níveis de interesse desejado.

No tipo de chassi em que se enquadra a do veículo objeto de estudo, *Space Frame*, uma das grandes vantagens desse tipo de estrutura é a facilidade e acessibilidade de trabalhar. Em contra partida é a que mais incrementa peso ao chassi quando se deseja melhorar sua performance estrutural através da adição de barras e elementos diversos à configuração inicial. A inclusão de tais elementos extras não se revela trivial, o incremento ou a mudança de qualquer que seja o item que possa alterar a geometria, massa ou a própria rigidez deve ser cuidadosamente avaliada.

Conclui-se também que as ferramentas computacionais são válidas e auxiliam demasiadamente a função de um engenheiro estrutural no desenvolvimento de produtos de forma prática e de custo reduzido que somente o ambiente virtual oferece. Contudo, é de responsabilidade do profissional a montagem correta das análises, desde à modelagem adequada em plataforma 3D, à correta configuração das condições de contorno que serão utilizadas nas diversas análises desejadas. Associando também à adequada interpretação dos dados dispostos pelo *software* em questão.

Voltando aos resultados da configuração da quinta variação reforçada, vale salientar que esse layout alcançado não é uma versão unânime, ou seja não é considerada a melhor condição possível, mas pertencente às várias possibilidades que poderiam tornar a estrutura a atender aos requisitos impostos.

A realização desse trabalho contribui para a reflexão de que uma estrutura como a do veículo objeto de estudo, a utilização de um chassi integralmente composto por barras circulares, podem conferir, se bem localizadas, a uma melhor performance do conjunto estrutural. Uma melhor rigidez torcional irá propiciar condições de atuação mais favoráveis aos demais sub sistemas presentes no veículo, uma vez que as deformações do chassi não entrarão como incógnitas em suas atuações.

16. TRABALHOS FUTUROS

Com o veículo é de uso pessoal e não está associado a qualquer categoria oficial do automobilismo, bem como a presente configuração do chassi não cumpre integralmente os requisitos estipulados e conhecendo uma possível configuração que possa atender

O primeiro trabalho futuro é a construção física do diversos travamentos expostos na quinta variação reforçada do chassi original. Analisando o quão pode interferir a substituição do material AISI SAE 1020 por outros como é o caso do aço de cromo-molibdênio 4130.

Como segundo trabalho futuro, definido a estrutura a ser utilizada, desenvolver um crash box para a parte frontal do chassi do Fórmula. A estrutura do tipo crash box é um artifício utilizado inclusive densamente na indústria de veículos de passeio, que tem o viés de geral uma estrutura capaz de absorver a impactos, reduzindo assim os efeitos de uma possível colisão.

Realizado esses trabalhos futuros a intensão é usar o veículo nos autódromos disponíveis e sempre que possível melhorar em alguma coisa o sistema do veículo como um todo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFIA

Adams, H., 1993, “Chassis Engineering”, Hp Books.

ANSYS Tutorials, 2011

Canut, F. A. (2014). “Análise Estrutural do Chassi de um Veículo Fórmula SAE pelo Método de Elementos Finitos”. Monografia de Graduação, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica.

Eurenius, C. A., Danielsson, N., Khokar, A., Krane, E., Olofsson, M., & Wass, J. (2013). “Analysis of Composite Chassis”. Bachelor Thesis, Chalmers University of Technology, The Department of Applied Mechanics, Göteborg, Sweden.

Gillespie, Thomas D. “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, Society of Automotive Engineers Inc., USA, 1992.

Happian, J.S., 2002, “An Introduction to Modern Vehicle Design”; ISBN 0 7680 0596 5 ON –R-295; Society of Automotive Engineers, Inc.; Reed Educational and Professional Publishing;

J. Chaskalovic. (2008). “Finite Element Methods for Engineering Sciences”.

Joseph E. Shigley. (2004). “Projeto de Engenharia Mecânica

Kimbal, S., 1999, “Don't focus on stress when stiffness is the problem“, Machine Design Magazine; Laucadia; California; 4p;

Marek Borowiec. (2008). “Chaotic vibration of a quarter-car model excited by the road”.

MILLIKEN, W.F., MILLIKEN, D.L., Race Car Vehicle Dynamics Warrendale. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1995.

NICOLAZZI, L.C., LEAL, L.C.M., ROSA, E., 2008, “Uma Introdução a Modelagem quase Estática de Veículos Automotores de Rodas”, Publicação interna do GRANTE, UFSC, Florianópolis.

Rao, S. “Vibrações Mecânicas”, Quarta edição, Pearson, 2008.

RILEY, W.B., GEORGE, A.R., “Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis”, Motorsports Engineering Conference and Exhibition, 2002-01-3300, Indianapolis, Indiana, December 2-5, 2002.

SAMPO, Enrico; SORNITTI, Aldo; CROCOMBE, Andrews. Chassis Torsional Stiffnes:”Analysis of theInfluence on Vehicle Dynamics”. In: CONGRESS 2010 SAE Canada, Surrey. Chassis torcional Stifdness. Surrey: SAE Paper 2010-01-0094,2010.

Storto, F. H. (2011). “Projeto de Monocoque para Veículo Fórmula SAE Utilizando Materiais Compósitos de Matriz Polimérica”.

THOMPSON, L.L., LAMPERT, J.K., LAW, E.H., "Design of a Twist Fixture to Measure the Torsional Stiffness of a Winston Cup Chassis", Motorsports Engineering Conference and Exposition, 983054, Dearborn, Michigan, November 16-19, 1998.

Tremayne, D. (2004). "The Science of Formula One Design".

”
.

ANEXO

			Pág.
<hr/>			
Anexo 1	Fotos reais do veículo objeto de estudo		129
Anexo 2	Configuração do veículo na plataforma <i>CarSim</i>		131
Anexo 3	Relatório das análises realizadas <i>Ansys Workbench</i>		131
Anexo 4	Propagação de erro		131
<hr/>			

ANEXO 1: Fotos Reais Veículo Objeto de Estudo



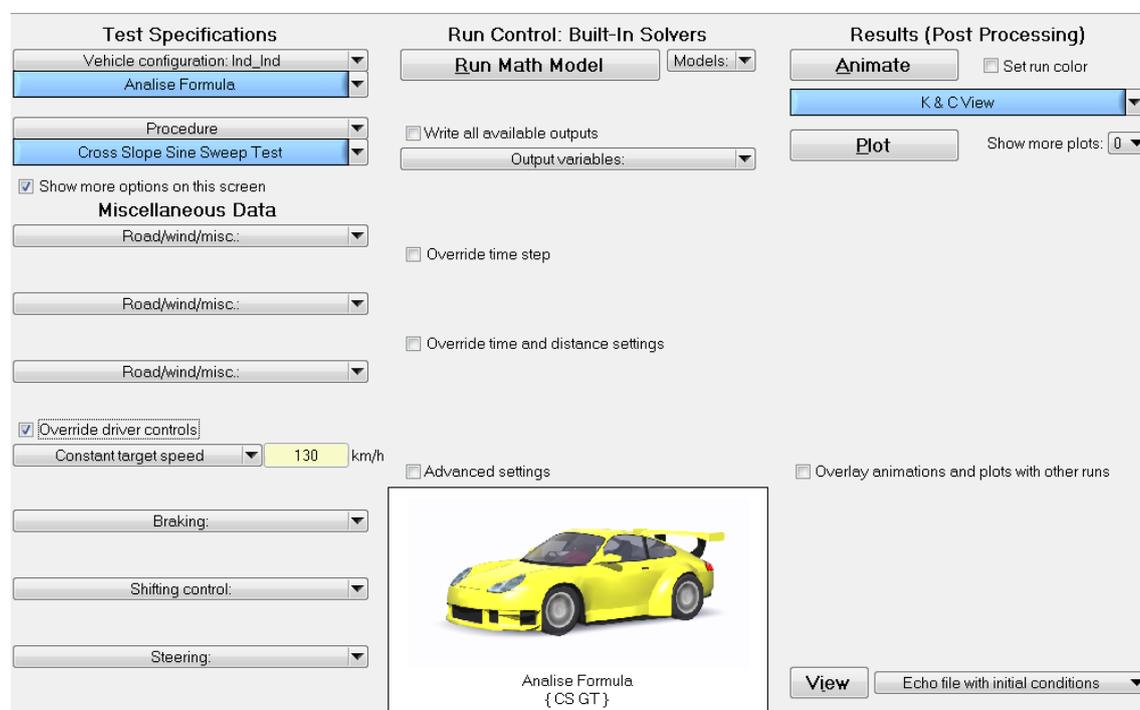




Anexo 2: Configuração do veículo na plataforma *CarSim*

O software de dinâmica veicular *CarSim* é totalmente configurável, trazendo a realidade do veículo objeto de estudo para a plataforma, utilizando as abas de interação é possível modelar o veículo em que se deseja trabalhar.

As imagens a seguir ilustram a interação com o programa configurando as principais características do modelo analisado para a realização do teste em vigor.



Aba principal de interação do programa

Vehicle Body

Sprung mass: Rigid Sprung Mass
GT, Rear Engine Sports Car Sprung Mass

Aerodynamics Pitch, Bounce, Yaw
GT Aero

Animator Data

Vehicle animator data: Vehicle Shape
GT

Systems

Powertrain: Rear-wheel drive
300 kW, 6-spd., 2.87 Ratio (MT)

Brake system: 4-wheel system
GT w/ ABS

Steering system: 4-wheel steer
GT; Manual R&P

Misc. keywords and values:

Miscellaneous system data:

3x1 image scale
 

Front

Suspension type: Independent
GT - Front Suspension

Front kinematics: Independent
GT - Front Comp.

Front compliance: Independent
GT - Front Comp.

Right-front tire: Tire
Open Wheel Top Level - Road Course Front

Left-front tire: Tire
Open Wheel Top Level - Road Course Front

Miscellaneous front data:

Rear

Suspension type: Independent
GT - Rear Suspension

Rear kinematics: Independent
GT - Rear Comp.

Rear compliance: Independent
GT - Rear Comp.

Right-rear tire: Tire
Open Wheel Top Level - Road Course Rear

Left-rear tire: Tire
Open Wheel Top Level - Road Course Rear

Miscellaneous rear data:

Configuração das características básicas do modelo analisado.

All dimensions and coordinates are in millimeters

The inertial properties are for the sprung mass in the design configuration, with no additional loading.

Sprung mass: 500 kg	<input type="checkbox"/> Edit radii of gyration
Roll inertia (I _{xx}): 56,096 kg-m ²	P _x : 0.335 m
Pitch inertia (I _{yy}): 8,061 kg-m ²	P _y : 0.126 m
Yaw inertia (I _{zz}): 57,955 kg-m ²	P _z : 0.338 m
Product (I _{xy}): 0 kg-m ²	
Product (I _{xz}): 0 kg-m ²	
Product (I _{yz}): 0 kg-m ²	

Inertia and radius of gyration are related by the equation: $I = M \cdot R^2$

Advanced settings (optional license required)
Basic

Configuração das medidas e peso sobre cada um dos eixos do modelo analisado.

Mass and Inertia

Unsprung mass (both sides): kg
 Fraction steered (0-1): -

Spin inertia for each side:
 Left: Right: kg-m²

Wheel centers: 1420 mm
 Dimensions are in millimeters

Set wheel center height here

Lateral coordinate of suspension center: mm

Note:
No roll center location is specified because the location and movement of the axle are defined by the kinematic data.

Static Alignment Settings

	Left	Right	deg
Camber:	<input type="text" value="-2.5"/>	<input type="text" value="-2.5"/>	
Toe:	<input type="text" value="-0.1"/>	<input type="text" value="-0.1"/>	

Kinematics Based on Jounce

Define jounce from spring data

Wheel Dive Movement Due to Jounce

Left wheel dive (caster change): Dive table Front Strut - Front Dive Angle	Right wheel dive (caster change): Dive table Front Strut - Front Dive Angle
Left wheel X: Longitudinal Movement Front Strut - Longitudinal Movement	Right wheel X: Longitudinal Movement Front Strut - Longitudinal Movement

Wheel Roll Movement Due to Jounce

Left wheel camber: Camber Front Strut - Camber	Right wheel camber: Camber Front Strut - Camber
Left wheel lateral (-Y): Lateral Movement Front Strut - Lateral Movement	Right wheel lateral (+Y): Lateral Movement Front Strut - Lateral Movement

Toe (Steer) Due to Jounce

Left wheel toe: Toe Front Strut - Toe Change	Right wheel toe: Toe Front Strut - Toe Change
---	--

Parâmetros da suspensão.

Driver Controls

Constant target speed: km/h

Braking: Brake control
Spike Braking of 0.8 MPa @ 15 sec.

Shifting control: Closed-loop shift control
AT All Gears

Steering: Driver path follower
No Offset 1 sec. Preview

Additional Data

Misc.: 3D road
Bump (Very Sharp 3.5 cm High, 40 cm Long)

Misc.: Generic group
2 Axle - Fx, Fy, Fz

Misc.:
Misc.:

Start and Stop Conditions

Stop run at specified time

Time (sec): Path station (m):

Stop: Road forward

Specify initialization details?

Additional Data

Misc.:
Misc.:
Misc.:
Misc.:
Misc.:

Plot Definitions

- Vertical Forces
- Vertical Accel. of Sprung Mass CG's
- Ground Elevation
- Steering Wheel Angle
- Steer Torque
- Damping Force
- Spring: Force vs. Compression
- Camber vs Jounce - Front
- Camber vs Jounce - Rear
- Pitch Angle of Sprung Masses
- Roll Angle of Sprung Masses
- Damping Force
- {No dataset selected}

Configuração para realização do teste selecionado.

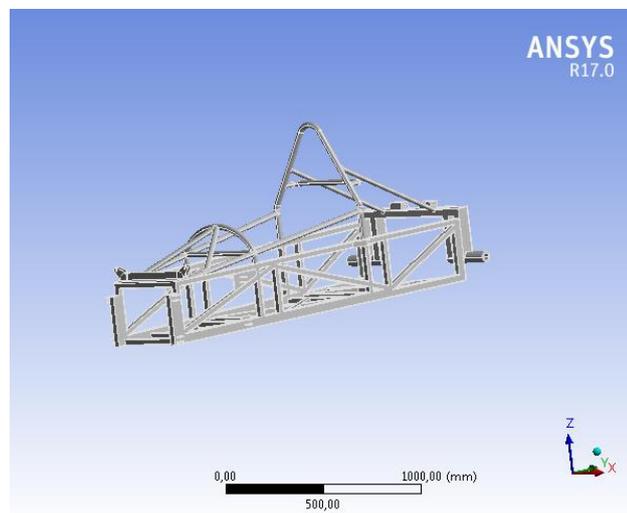
Anexo 3: Relatório das análises realizadas *Ansys Workbench*

O software de análise e desenvolvimento Ansys, na plataforma Workbench disponibiliza relatório das atividades realizadas, abaixo é disponibilizado o relatório referente a análise estática. Para as demais análises realizadas segue esquemático semelhante:



Project

First Saved	Wednesday, June 13, 2018
Last Saved	Tuesday, October 23, 2018
Product Version	17.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- [Units](#)
 - [Model \(B4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Estrutura completa chassi tcc](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Mesh](#)
 - [Static Structural \(B5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(B6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Results](#)
 - [Fatigue Tool](#)
 - [Results](#)
1. [Material Data](#)
 - a. [AISI SAE 1020](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Análise estática

Geometry

TABLE 2
Model (B4) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\lucas\Desktop\lucas\material tcc\ANSYS\analise chassi tcc_files\dp0\Geom\DM\Geom.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	892,63 mm
Length Y	2358,3 mm
Length Z	940,58 mm
Properties	
Volume	1,232e+007 mm ³
Mass	96,714 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	

Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	115830
Elements	59191
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\Isabella\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (B4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Estrutura completa chassi tcc</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Glow	0
Shininess	1
Transparency	1
Specularity	1
Definition	
Suppressed	No
ID (Beta)	16
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
Material	
Assignment	AISI SAE 1020
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	892,63 mm

Length Y	2358,3 mm
Length Z	940,58 mm
Properties	
Volume	1,232e+007 mm ³
Mass	96,714 kg
Centroid X	2,1081e-002 mm
Centroid Y	1260,5 mm
Centroid Z	203,24 mm
Moment of Inertia Ip1	5,5965e+007 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	8,0278e+006 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	5,7833e+007 kg·mm ²
Statistics	
Nodes	115830
Elements	59191
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Mesh

TABLE 5
Model (B4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Coarse
Element Size	40,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium

Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Minimum Edge Length	1,9521e-003 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Use Asymmetric Mapped Mesh (Beta)	No
Topology Checking	No
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	115830
Elements	59191
Mesh Metric	None

Static Structural (B5)

TABLE 6
Model (B4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (B5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 7
Model (B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled

Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Cache Results in Memory (Beta)	Never
Combined Distributed Result Files (Beta)	Program Controlled
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\lsabella\Desktop\lucas\material tcc\ANSYS\analise chassi tcc_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 8
Model (B4) > Static Structural (B5) > Loads

Object Name	<i>Força de reação dianteira esquerda (1050N)</i>	<i>força de reação dianteira direita (1050N)</i>	<i>Força de reação traseira esquerda (1450N)</i>	<i>Força de reação traseira direita (1450N)</i>	<i>Fixação estrutura (Cylindrical Support)</i>
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	20 Faces		10 Faces		16 Faces
Definition					
ID (Beta)	44	46	48	50	59

Type	Force		Cylindrical Support
Define By	Components		
Coordinate System	Global Coordinate System		
X Component	0, N (ramped)		
Y Component	0, N (ramped)		
Z Component	1050, N (ramped)	1450, N (ramped)	
Suppressed	No		
Radial			Free
Axial			Fixed
Tangential			Fixed

FIGURE 1
Model (B4) > Static Structural (B5) > Força de reação dianteira esquerda (1050N)

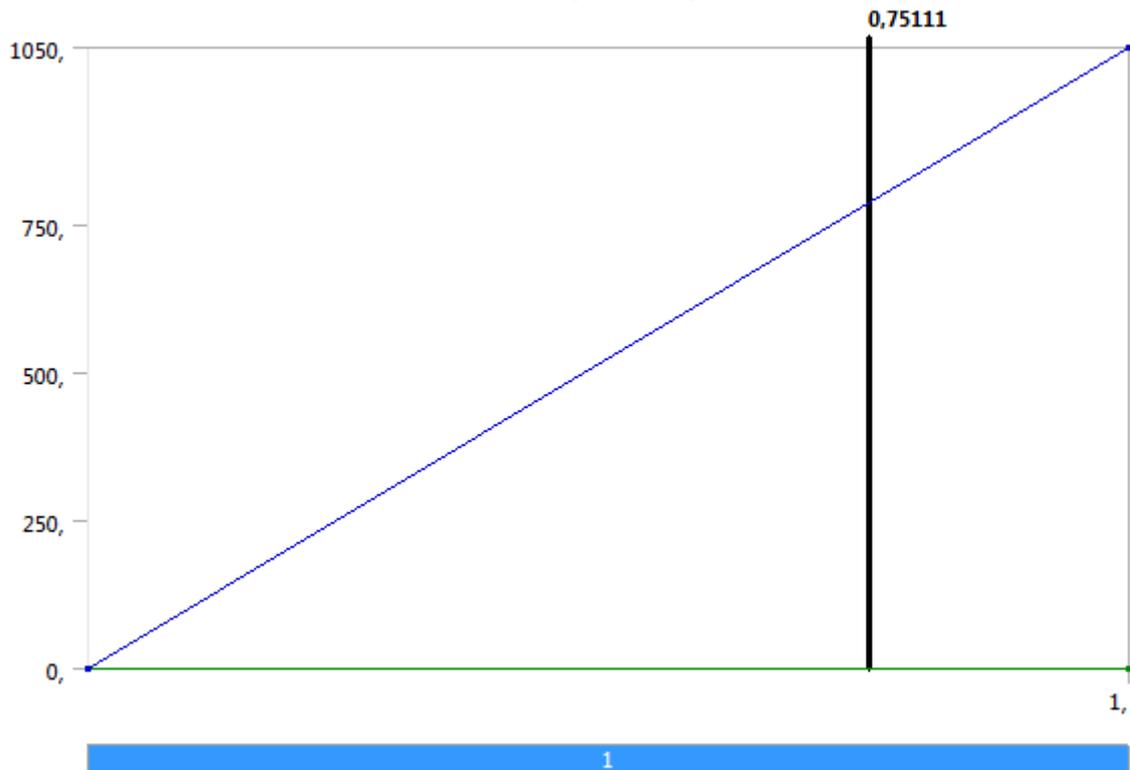


FIGURE 2
Model (B4) > Static Structural (B5) > força de reação dianteira direita (1050N)

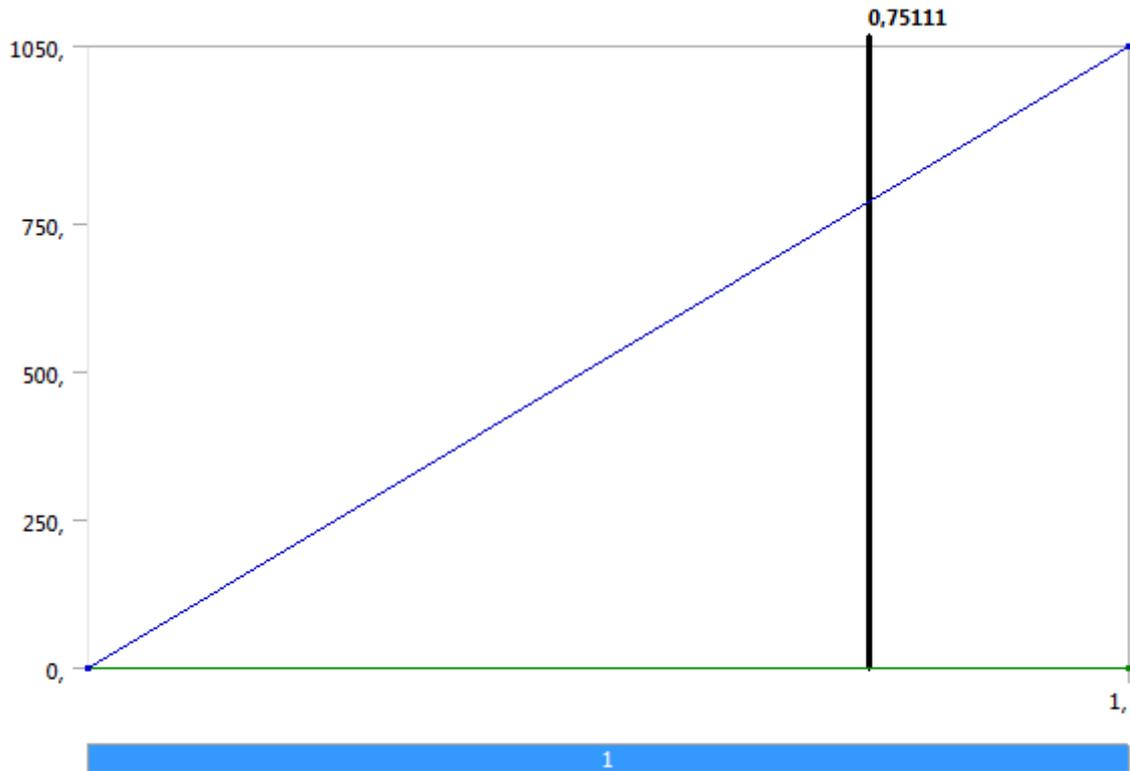


FIGURE 3
Model (B4) > Static Structural (B5) > Força de reação traseira esquerda (1450N)

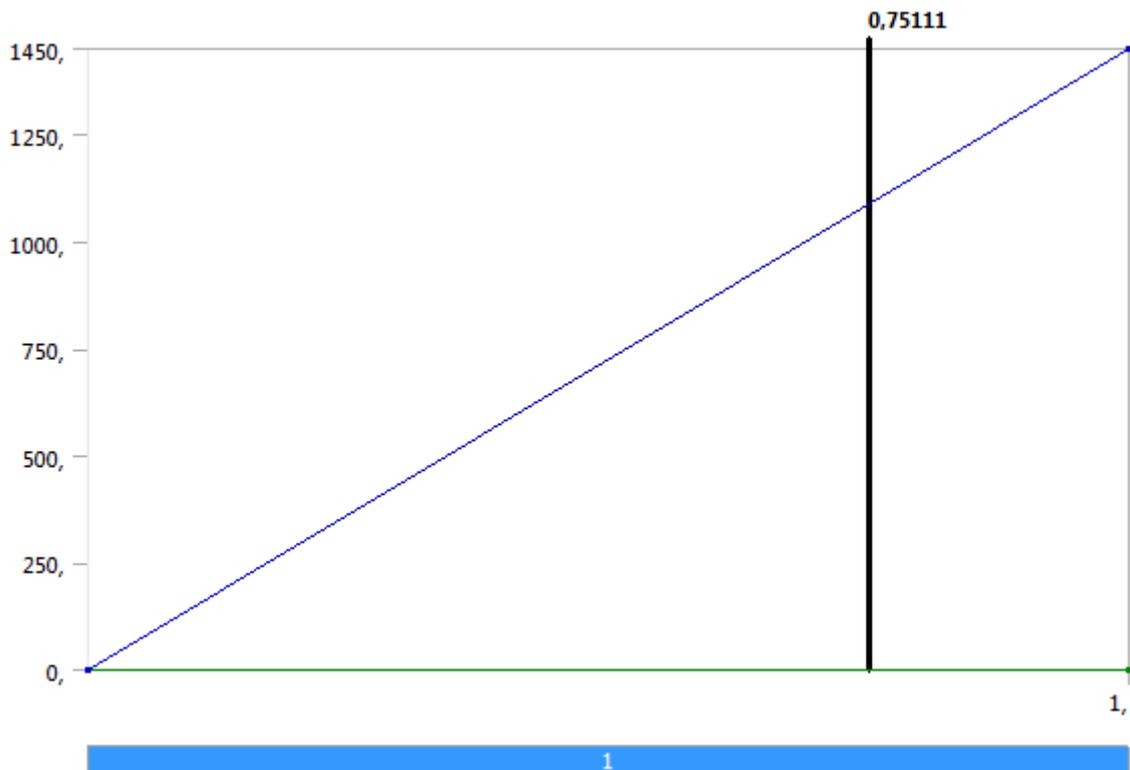
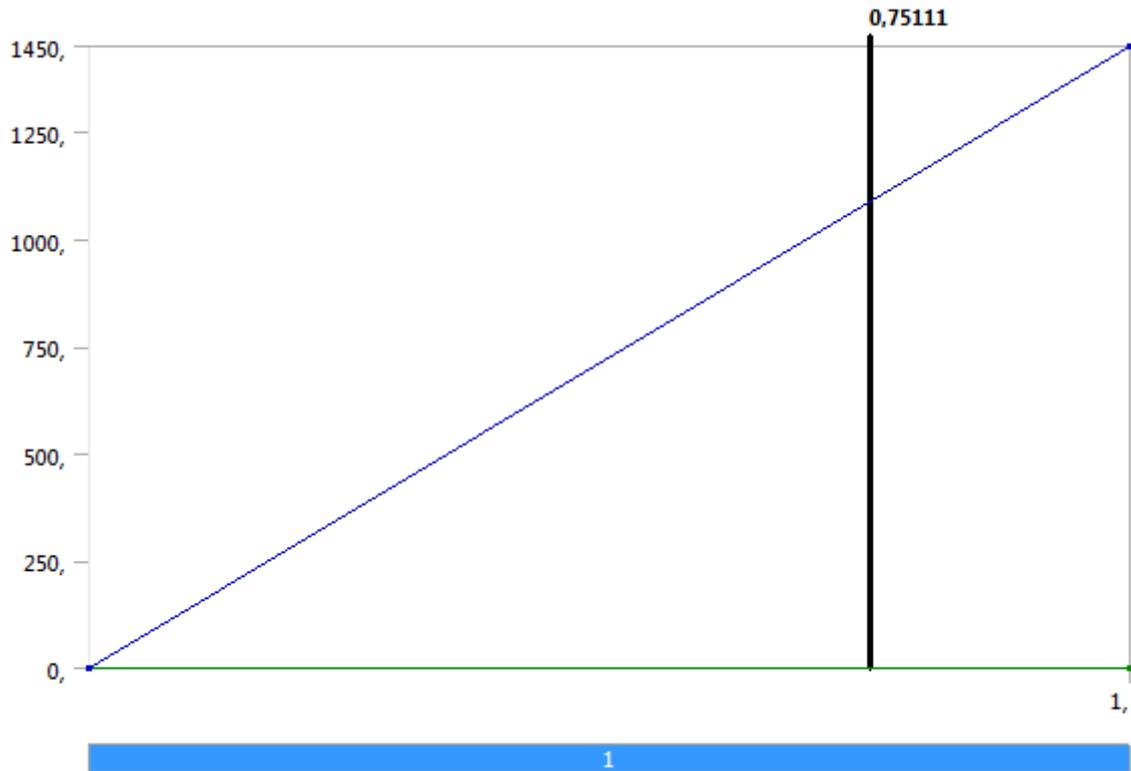


FIGURE 4
Model (B4) > Static Structural (B5) > Força de reação traseira direita (1450N)



Solution (B6)

TABLE 9
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution

Object Name	<i>Solution (B6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	43, s
MAPDL Memory Used	1,7559 GB
MAPDL Result File Size	47,063 MB
Post Processing	
Distributed Post Processing (Beta)	Program Controlled
Mesh Source (Beta)	Program Controlled
Calculate Beam Section Results	No
Calculate Stress/Strain on Demand (Beta)	No

TABLE 10
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Identify Element Violations	0
Update Interval	2,5 s

Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 11
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	<i>Total Deformation</i>	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	3,4114e-007 mm	1,1034e-003 MPa
Maximum	0,13291 mm	93,231 MPa
Minimum Occurs On	Estrutura completa chassi tcc	
Maximum Occurs On	Estrutura completa chassi tcc	
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	

TABLE 12
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1,	3,4114e-007	0,13291

TABLE 13
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,	1,1034e-003	93,231

TABLE 14
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Fatigue Tools

Object Name	<i>Fatigue Tool</i>
State	Solved

Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	1,
Loading	
Type	Zero-Based
Scale Factor	1,
Definition	
Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Gerber
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
Results Input (Beta)	Stress
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

FIGURE 7
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Fatigue Tool

Constant Amplitude Load
Zero-Based

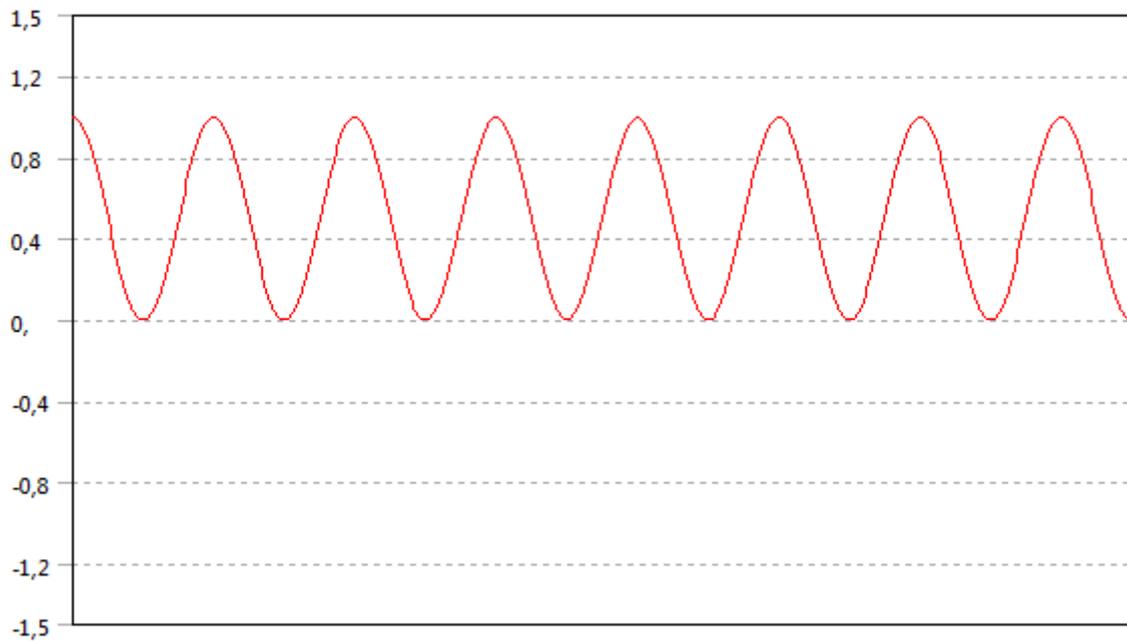


FIGURE 8
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Fatigue Tool

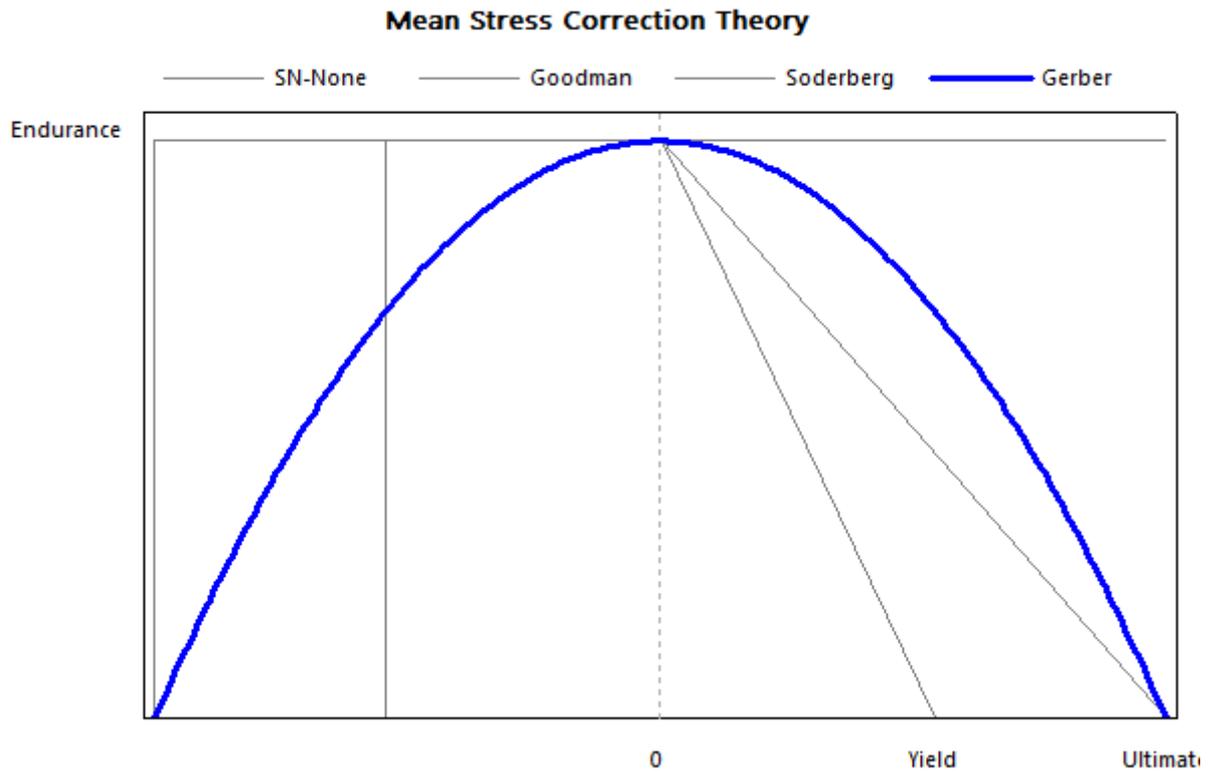


TABLE 15
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Fatigue Tool > Results

Object Name	Life	Safety Factor
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Life	Safety Factor
Identifier		
Suppressed	No	
Design Life		1,e+009 cycles
Integration Point Results		
Average Across Bodies	No	
Results		
Minimum	1,e+006 cycles	1,7884
Minimum Occurs On	Estrutura completa chassi tcc	

FIGURE 9
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Fatigue Tool > Life

Material Data

AISI SAE 1020

TABLE 18
AISI SAE 1020 > Constants

Density	7,87e-006 kg mm ⁻³
---------	-------------------------------

Coefficient of Thermal Expansion	1,17e-005 C ⁻¹
Specific Heat	51,9 W/MK
Thermal Conductivity	6,59e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 19
AISI SAE 1020 > Color

Red	Green	Blue
132,	139,	179,

TABLE 20
AISI SAE 1020 > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0,

TABLE 21
AISI SAE 1020 > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
390,

TABLE 22
AISI SAE 1020 > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
390,

TABLE 23
AISI SAE 1020 > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
470,

TABLE 24
AISI SAE 1020 > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C
22,

TABLE 25
AISI SAE 1020 > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999,	10,	0,
2827,	20,	0,
1896,	50,	0,
1413,	100,	0,
1069,	200,	0,
441,	2000,	0,
262,	10000	0,
214,	20000	0,
138,	1,e+005	0,
114,	2,e+005	0,
86,2	1,e+006	0,

TABLE 26
AISI SAE 1020 > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920,	-0,106	0,213	-0,47	1000,	0,2

TABLE 27
AISI SAE 1020 > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2,e+005	0,3	1,6667e+005	76923

TABLE 28
AISI SAE 1020 > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

Model (C4)

Geometry

TABLE 2
Model (C4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\Isabella\Desktop\lucas\material tcc\ANSYS\analyse chassi tcc_files\dp0\Geom\DM\Geom.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	892,63 mm
Length Y	2358,3 mm
Length Z	940,58 mm
Properties	
Volume	1,232e+007 mm ³
Mass	96,714 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	115830

Elements	59191
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\Isabella\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (C4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Estrutura completa chassi tcc</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Glow	0
Shininess	1
Transparency	1
Specularity	1
Definition	
Suppressed	No
ID (Beta)	16
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
Material	
Assignment	AISI SAE 1020
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	892,63 mm
Length Y	2358,3 mm
Length Z	940,58 mm
Properties	

Volume	1,232e+007 mm ³
Mass	96,714 kg
Centroid X	2,1081e-002 mm
Centroid Y	1260,5 mm
Centroid Z	203,24 mm
Moment of Inertia Ip1	5,5965e+007 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	8,0278e+006 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	5,7833e+007 kg·mm ²
Statistics	
Nodes	115830
Elements	59191
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (C4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Mesh

TABLE 5
Model (C4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Coarse
Element Size	40,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Based Defeaturing	On

Defeaturing Tolerance	Default
Minimum Edge Length	1,9521e-003 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Use Asymmetric Mapped Mesh (Beta)	No
Topology Checking	No
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	115830
Elements	59191
Mesh Metric	None

Static Structural (C5)

TABLE 6
Model (C4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (C5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 7
Model (C4) > Static Structural (C5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off

Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Cache Results in Memory (Beta)	Never
Combined Distributed Result Files (Beta)	Program Controlled
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\Isabella\Desktop\lucas\material tcc\ANSYS\analise chassi tcc_files\dp0\SYS-1\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 8
Model (C4) > Static Structural (C5) > Loads

Object Name	<i>massa total no CG (P=500Kg)</i>	<i>reação roda esquerda dianteira (128,62kg)</i>	<i>reação roda direita dianteira (710,8Kg)</i>	<i>reação roda traseira esquerda (330Kg)</i>	<i>reação roda traseira direita (P=138Kg)</i>	<i>Remote Displacement</i>
State	Fully Defined					
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	1 Face	20 Faces		10 Faces		1 Face
Coordinate System	Global Coordinate System					Global Coordinate System
X Coordinate	-1,6497e-004 mm					-3,981e-015 mm

Y Coordinate	1279,1 mm					2298,3 mm
Z Coordinate	316,24 mm					289,78 mm
Location	Defined					Defined
Definition						
ID (Beta)	28	51	53	55	57	60
Type	Remote Force	Force				Remote Displacement
Define By	Components					
X Component	0, N (ramped)					0, mm (ramped)
Y Component	0, N (ramped)					0, mm (ramped)
Z Component	-24651 N (ramped)	12863 N (ramped)	7108,9 N (ramped)	3300, N (ramped)	1380, N (ramped)	0, mm (ramped)
Suppressed	No					
Behavior	Deformable					Deformable
Coordinate System	Global Coordinate System					
Rotation X						0, ° (ramped)
Rotation Y						0, ° (ramped)
Rotation Z						0, ° (ramped)
Advanced						
Pinball Region	All					All

FIGURE 1
Model (C4) > Static Structural (C5) > massa total no CG (P=500Kg)

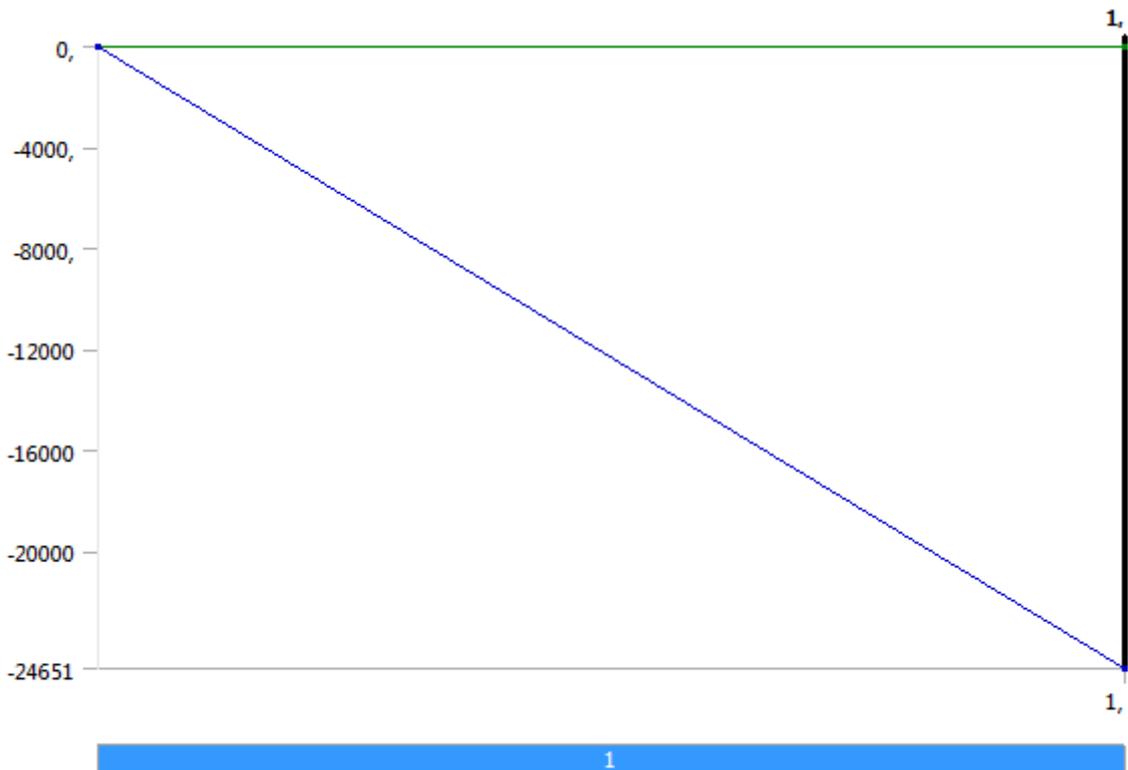


FIGURE 2
Model (C4) > Static Structural (C5) > reação roda esquerda dianteira (128,62kg)

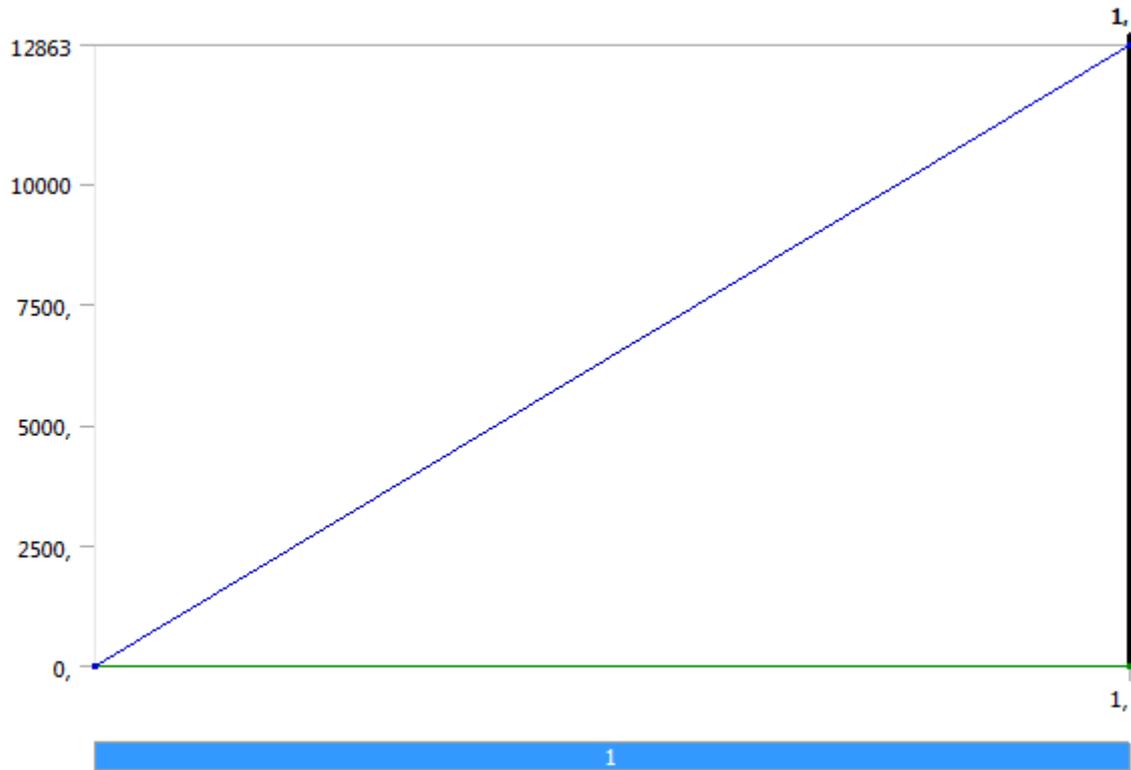


FIGURE 3
Model (C4) > Static Structural (C5) > reação roda direita dianteira (710,8Kg)

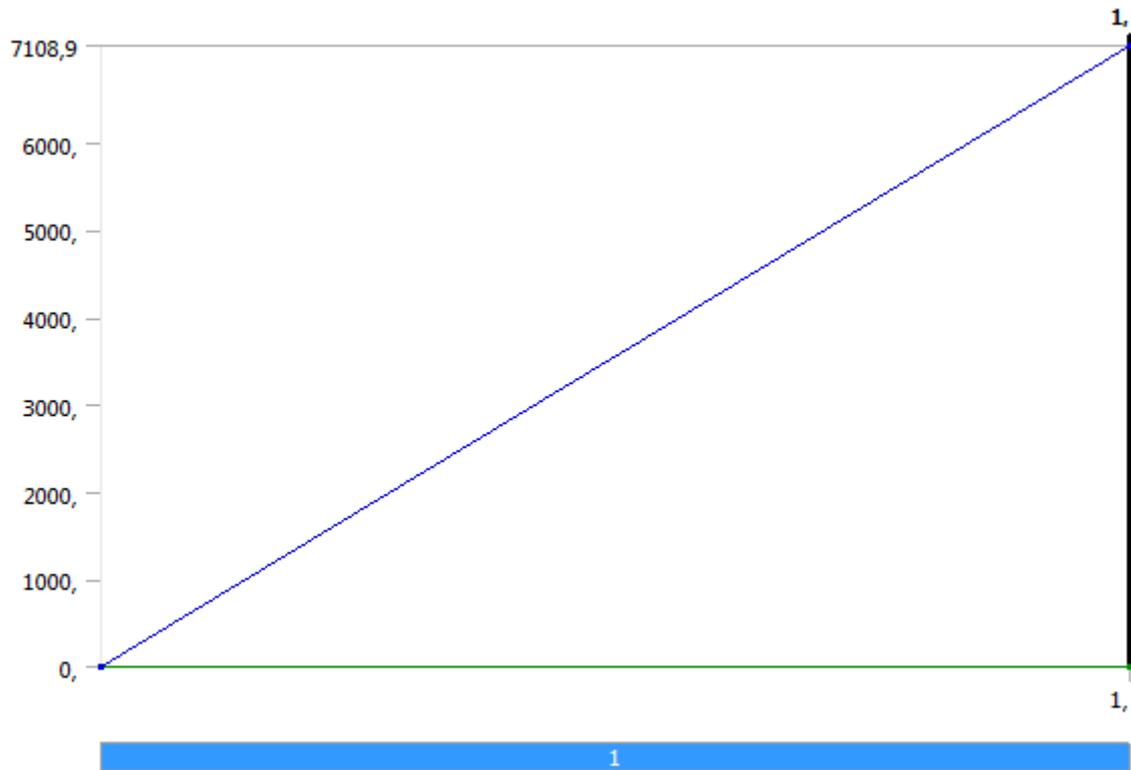


FIGURE 4
Model (C4) > Static Structural (C5) > reação roda traseira esquerda (330Kg)

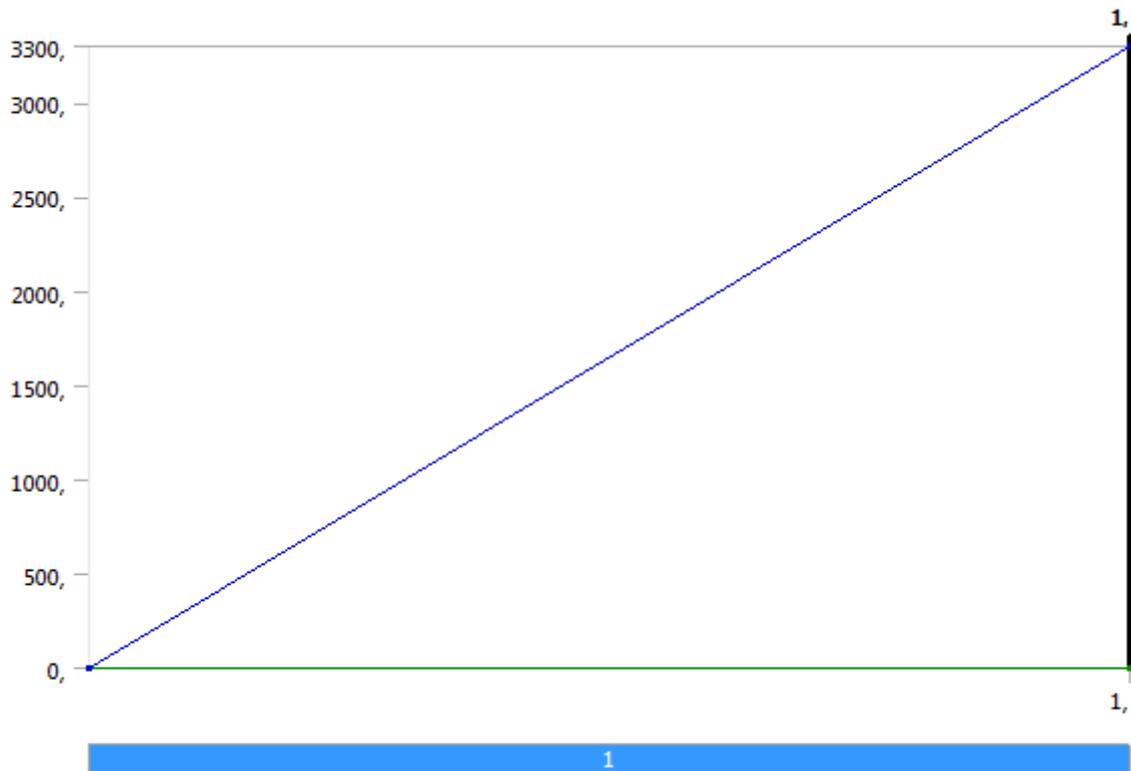


FIGURE 5
Model (C4) > Static Structural (C5) > reação roda traseira direita (P=138Kg)

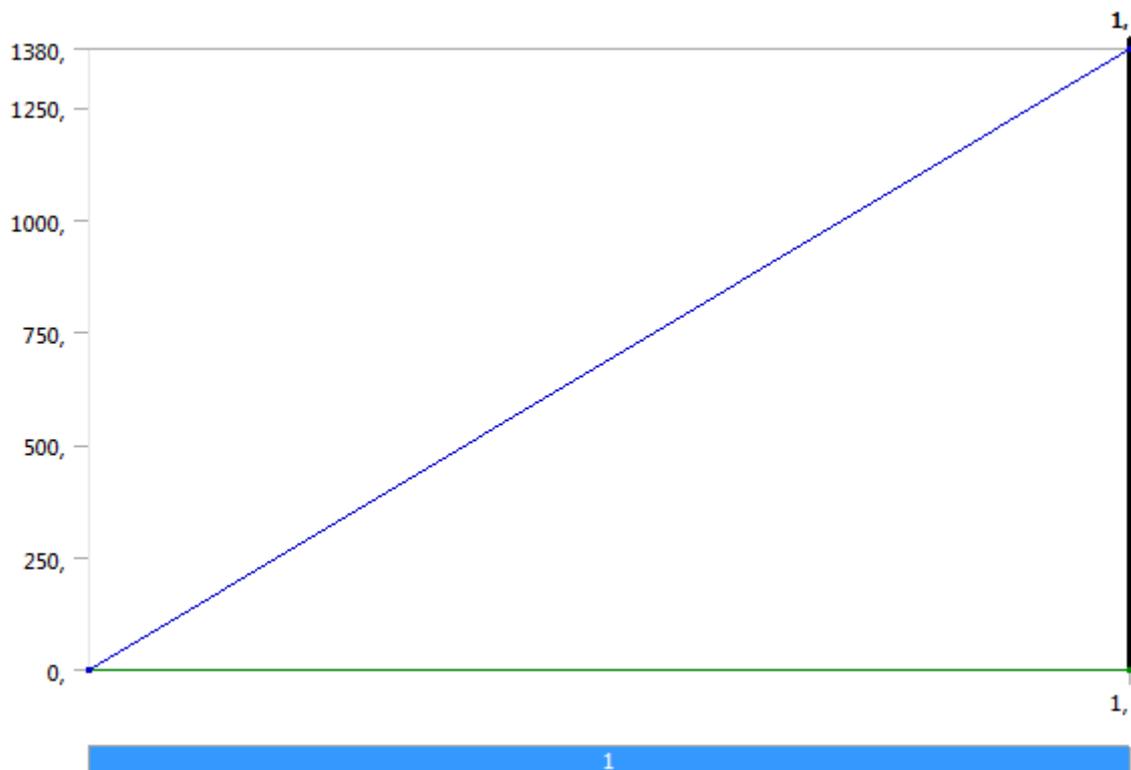
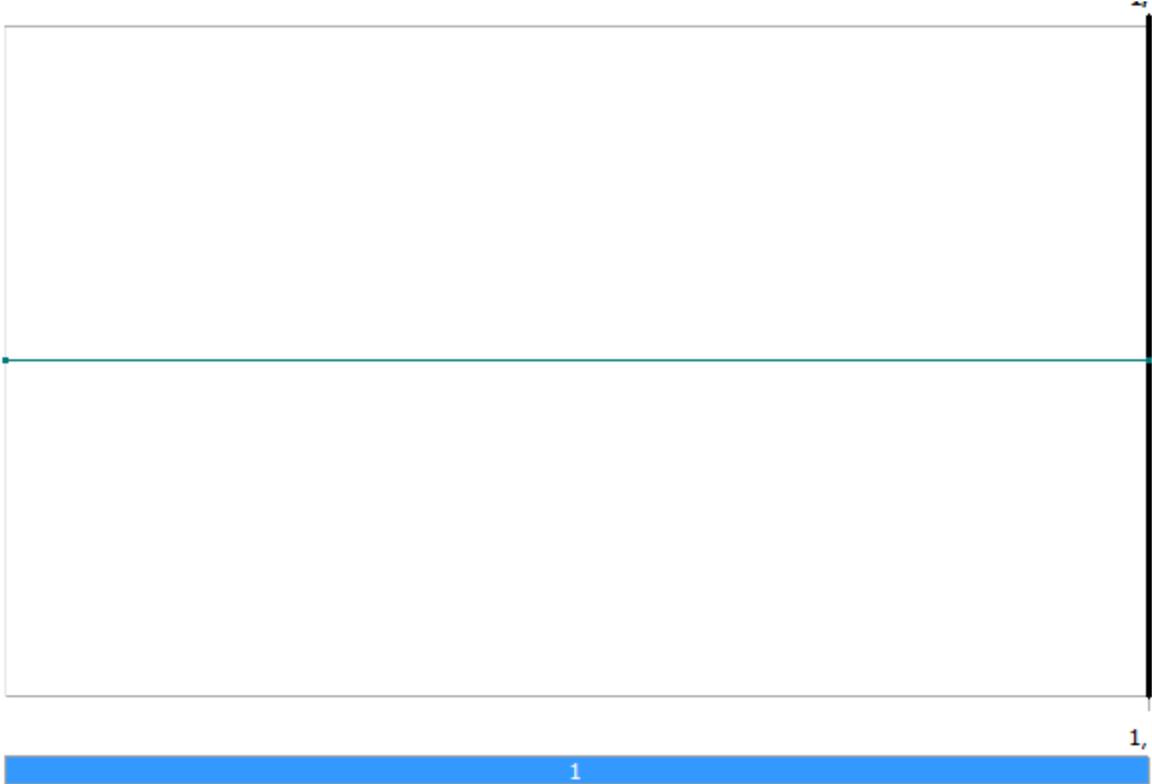


FIGURE 6
Model (C4) > Static Structural (C5) > Remote Displacement



Solution (C6)

TABLE 9
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution

Object Name	<i>Solution (C6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	31, s
MAPDL Memory Used	1,9189 GB
MAPDL Result File Size	49,75 MB
Post Processing	
Distributed Post Processing (Beta)	Program Controlled
Mesh Source (Beta)	Program Controlled
Calculate Beam Section Results	No
Calculate Stress/Strain on Demand (Beta)	No

TABLE 10
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Identify Element Violations	0
Update Interval	2,5 s

Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 11
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Results

Object Name	<i>Total Deformation</i>	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0,12514 mm	1,3234e-002 MPa
Maximum	27,787 mm	642,34 MPa
Minimum Occurs On	Estrutura completa chassi tcc	
Maximum Occurs On	Estrutura completa chassi tcc	
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	

FIGURE 7
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Total Deformation

TABLE 12
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1,	0,12514	27,787

TABLE 13
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,	1,3234e-002	642,34

TABLE 14
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Fatigue Tools

Object Name	<i>Fatigue Tool</i>
State	Solved
Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	1,
Loading	
Type	Zero-Based
Scale Factor	1,
Definition	
Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Gerber
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
Results Input (Beta)	Stress
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

FIGURE 9
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Fatigue Tool

Constant Amplitude Load
Zero-Based

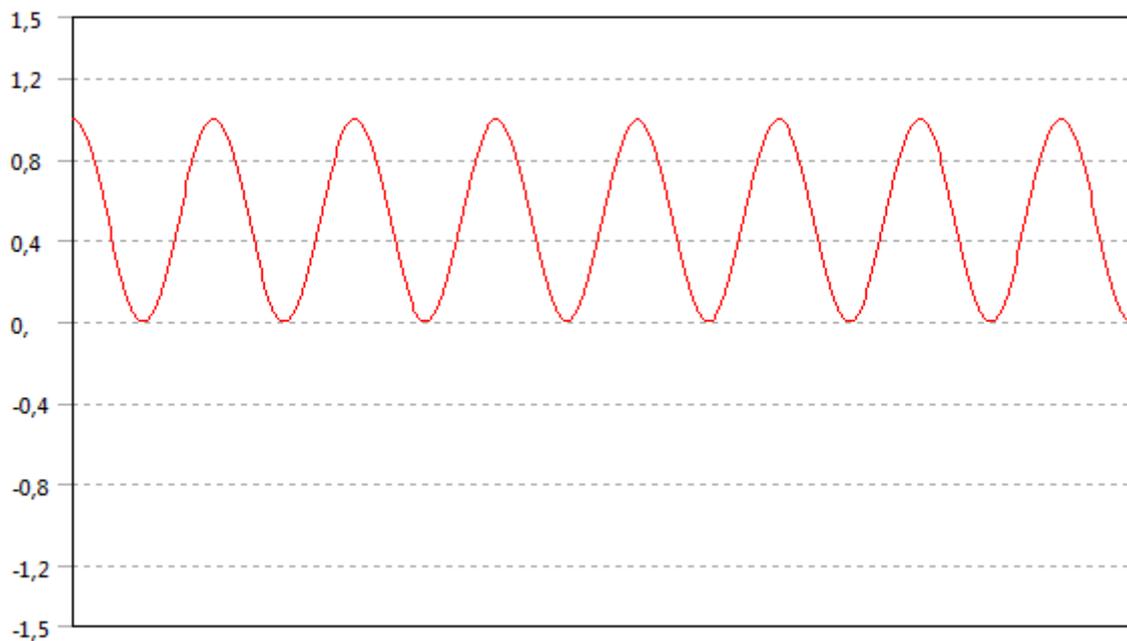


FIGURE 10
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Fatigue Tool

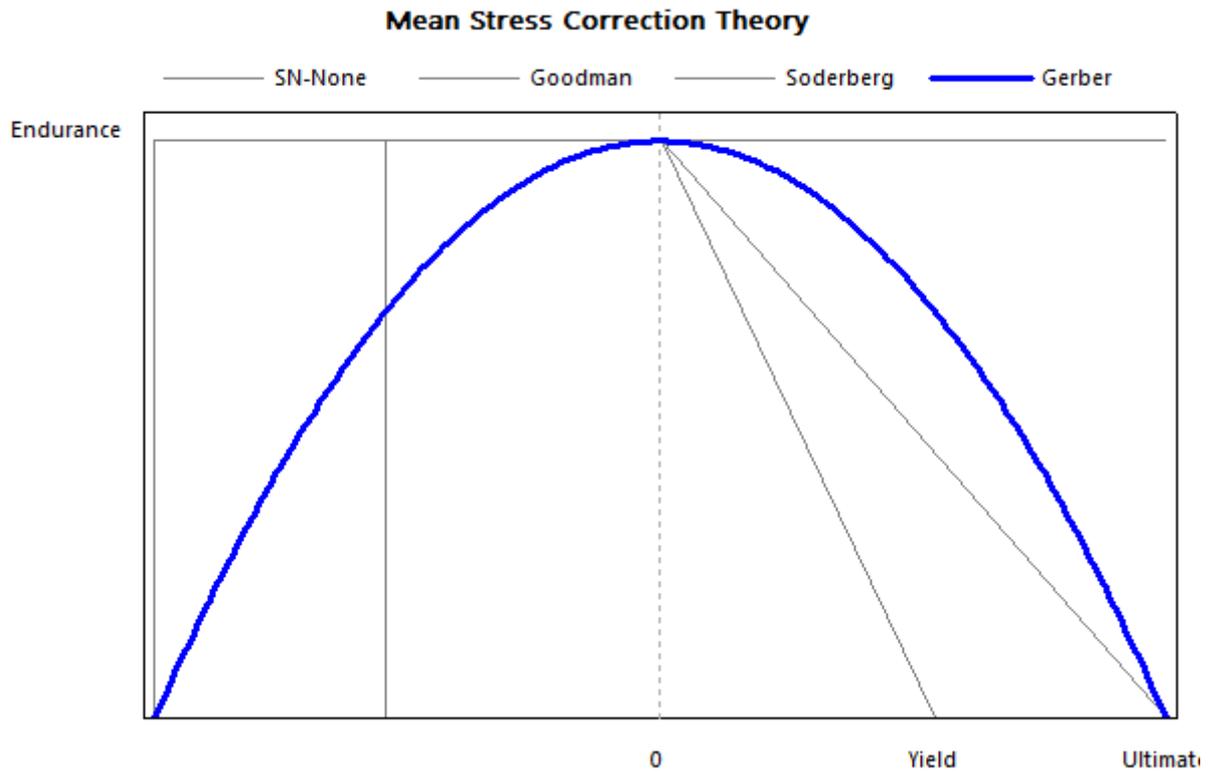


TABLE 15
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Fatigue Tool > Results

Object Name	Life	Safety Factor
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Life	Safety Factor
Identifier		
Suppressed	No	
Design Life		1,e+009 cycles
Integration Point Results		
Average Across Bodies	No	
Results		
Minimum	802,1 cycles	0,25958
Minimum Occurs On	Estrutura completa chassi tcc	

FIGURE 11
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Fatigue Tool > Life

TABLE 16
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Fatigue Tool > Life

Time [s]	Minimum	Maximum
1,	802,1	1,e+006

TABLE 17
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Fatigue Tool > Safety Factor

Time [s]	Minimum	Maximum
1,	0,25958	15,

Material Data

AISI SAE 1020

TABLE 18
AISI SAE 1020 > Constants

Density	7,87e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,17e-005 C ⁻¹
Specific Heat	51,9/mK
Thermal Conductivity	6,95e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 19
AISI SAE 1020 > Color

Red	Green	Blue
132,	139,	179,

TABLE 20
AISI SAE 1020 > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0,

TABLE 21
AISI SAE 1020 > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
390,

TABLE 22
AISI SAE 1020 > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
390,

TABLE 23
AISI SAE 1020 > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
470,

TABLE 24
AISI SAE 1020 > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C
22,

TABLE 25
AISI SAE 1020 > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999,	10,	0,
2827,	20,	0,
1896,	50,	0,
1413,	100,	0,

1069,	200,	0,
441,	2000,	0,
262,	10000	0,
214,	20000	0,
138,	1,e+005	0,
114,	2,e+005	0,
86,2	1,e+006	0,

TABLE 26
AISI SAE 1020 > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920,	-0,106	0,213	-0,47	1000,	0,2

TABLE 27
AISI SAE 1020 > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2,e+005	0,3	1,6667e+005	76923

TABLE 28
AISI SAE 1020 > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

Anexo 4: Propagação do erro.

Para o cálculo da propagação de incertezas será utilizada a equação 22 abaixo:

$$\sigma f^2 = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} * \partial x_i \right)^2 \quad [22]$$

Aplicando a equação 22 acima para na equação [14] para incerteza do torque aplicado

$$T = P * L_2 = mgL_2 \quad [14]$$

$$\sigma T^2 = g^2 [(L_2 \sigma m)^2 + (m \sigma L_2)^2] \quad [23]$$

$$\sigma T = g \sqrt{((L_2 \sigma m)^2 + (m \sigma L_2)^2)} \quad [24]$$

Utilizando os valores abaixo para cada valor de massa “m”:

$$\sigma m = 0,1 \text{ Kg}$$

$$\sigma L_2 = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$$

$$L_2 = 0,588 \text{ m}$$

Massa (Kg)	σT (Nm)
80	12,7

Fonte: Autor.

Para a incerteza da deflexão angular temos:

Aplicando a equação [22] na equação da deflexão angular [15]:

$$\sigma f^2 = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} * \partial_{x_i} \right)^2 \quad [22]$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{2 * \Delta}{L_1} \right] \quad [15]$$

$$\theta = \tan^{-1}[x]$$

$$\sigma \theta \cong \frac{\sigma x}{1 + x^2}$$

$$\sigma x = \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma \Delta y}{2w} \right)^2 + \left(\frac{\sigma w (\Delta y_1 + \Delta y_2)}{2w^2} \right)^2 \right)}$$

$$x = \frac{\Delta Y}{L_1}$$

Onde:

$$\sigma \Delta y = 0,01mm$$

$$\sigma_w = 1\text{mm}$$

$$W = 588\text{m}$$

X	σ_x	σ_θ
8,4E-4	4,00E-05	4,00E-05

Tabela do erro experimental da deflexão angular Fonte: Autor

Para a incerteza da rigidez torcional aplicando a equação [22] na equação da rigidez torcional [1], considerando o erro de θ desprezível, por ser muito pequeno, temos:

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad [1]$$

$$\sigma K_t = \frac{\sigma T}{\theta}$$

A tabela a seguir mostra o erro experimental da rigidez torcional.

Θ [deg]	σK_t [Nm/deg]
0,2148	470,4