

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ
TORCIONAL DE UM CHASSI DO TIPO *SPACEFRAME* DA EQUIPE BAJA SAE DA UFRGS

por

Thiago Longaray Gambôa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

Longaray Gambôa, Thiago
DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO
DA RIGIDEZ TORCIONAL DE UM CHASSI DO TIPO SPACEFRAME
DA EQUIPE BAJA SAE DA UFRGS / Thiago Longaray Gambôa.
-- 2020.
30 f.
Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Chassis veiculares. 2. Rigidez torcional. 3.
Dinâmica veicular. I. Milbrath De Leon, Daniel,
orient. II. Título.

Thiago Longaray Gambôa

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ
TORCIONAL DE CHASSI DO TIPO SPACEFRAME DA EQUIPE BAJA SAE DA UFRGS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Daniel Milbrath De Leon

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr Daniel Milbrath De Leon

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, novembro de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico, em especial, aos meus pais que se esforçaram e me apoiaram ao longo de toda minha formação.

Dedico à minha esposa, que sempre esteve ao meu lado independente das dificuldades.

Dedico à minha família, que tanto me incentivaram a continuar e não desistir desta formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me deu forças para continuar mesmo quando eu desacreditei ser possível.

Agradeço ao Professor Dr. Daniel Milbrath De Leon, pela excelente e dedicada orientação na realização deste trabalho.

Agradeço ao capitão da Equipe Tchê de BAJA SAE da UFRGS, Felipe de Paula Gross, pela dedicação no preparo do chassi e suporte ao desenho técnico.

Agradeço ao Heberton Rodeski, pelo suporte nas adaptações da suspensão veicular.

Agraço ao Lorenzo Corte Vuoto, pelas ideias e pela comunicação com a equipe.

Agradeço à Equipe Tchê de BAJA SAE da UFRGS pelo suporte técnico e esforço.

Agradeço ao GMAp da UFRGS, pelo fornecimento de materiais e equipamentos, como os relógios comparadores, especialmente ao Mestrando Rodrigo Rodrigues de Barros, pela sua atenção e paciência no meu atendimento.

Agradeço ao LAMEF, especialmente ao Dr. Marcelo Favaro Borges, por também emprestar seus equipamentos de medição mecânica, viabilizando a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu amigo, engenheiro mecânico Fabio Kirsch Carvalho, pelo suporte ao desenho técnico, mesmo em momentos tão difíceis.

Agradeço ao meu irmão, John Cristian Borges Gamboa, pelas correções e traduções.

Agraço aos meus familiares por estar sempre ao meu lado, pelo incentivo e apoio emocional e financeiro.

EPÍGRAFE

*É maravilhoso como o texto,
duro como a pederneira,
emite faíscas quando batido
com o aço da oração.*

Charles Haddon Spurgeon

Gambôa, Thiago L. **Desenvolvimento de um equipamento para determinação da rigidez torcional de um chassi do tipo spaceframe da equipe BAJA SAE da UFRGS**. 2020. 30p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RESUMO

Este trabalho proporciona à equipe BAJA SAE da UFRGS um método para obter a rigidez torcional do veículo de forma experimental. Neste trabalho é de interesse analisar essa propriedade apenas no chassi e no veículo inteiro aplicando o torque na estrutura da suspensão. Para tanto, um conjunto de equipamentos versáteis e adaptáveis a diferentes chassis são construídos de forma que o veículo tem a sua traseira fixada e a sua dianteira, com um pivô central, sofre um torque gradualmente conhecido através da força peso, respeitando os graus de liberdade que as fixações devem ter e levando em conta a estrutura da suspensão. Então é mensurada a sua deformação angular, tanto no veículo inteiro como apenas no chassi. Devido à ocorrência de histerese entre ensaios consecutivos, é feita a análise estatística dos dados obtidos nos últimos ensaios. Considerando uma distribuição normal com um erro associado a 95% de confiança somado à incerteza instrumental dos equipamentos utilizados, encontra-se um erro entre 4% a 8% dependendo de quais as considerações. Por fim é observada uma rigidez associada apenas ao chassi cerca de 34% mais elevada do que no veículo inteiramente.

PALAVRAS-CHAVE: rigidez, torção, experimental, chassi, BAJA.

Gamboa, Thiago L. **Development of an Equipment to Determine the Torsional Stiffness of a Spaceframe Chassis for the BAJA SAE Team at UFRGS.** 2020. 30f. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ABSTRACT

This work provides the BAJA SAE team at UFRGS a method to obtain experimentally the torsional stiffness of a BAJA SAE vehicle. This work is concerned with analysing this property either only at the chassis or at the whole vehicle by applying a torque at the suspension structure. For that, a set of versatile equipments, which are adaptable to multiple chassis are built in such a way that the vehicle has its rear fixed, and its front, with the aid of a central pivot, experiences a gradual torque known through the gravitational weight, respecting the fixed degrees of freedom and taking into account the suspension structure. -Then the angular deformation is measured both at the whole vehicle and at the chassis. Due to the occurrence of hysteresis between consecutive tests, statistical analysis of the data obtained from the last tests is made. Considering a normal distribution with an error associated to 95% confidence, summed to the instrumental uncertainty of the equipment used, an error between 4% and 8% is found, depending on what is considered. Finally the observed stiffness associated to the chassis is around 34% higher than that of the whole vehicle.

KEYWORDS: stiffness, torsional, experimentally, chassis, BAJA.

NOMENCLATURA

Símbolos

E	Módulo de elasticidade	[N m ⁻²]
F	Força peso	[N]
M	Massa	[kg]
g	Aleceração da gravidade	[m s ⁻²]
d	Braço de alavanca	[m]
T	Torque	[N m]
K	Rigidez torcional	[N m grau ⁻¹]
D_f	Distância entre relógios frontais	[m]
D_t	Distância entre relógios traseiros	[m]
r^2	Coefficiente de determinação	

Símbolos gregos

δ_{cfe}	Deslocamento do relógio no chassi frontal esquerdo	[mm]
δ_{cfd}	Deslocamento do relógio no chassi frontal direito	[mm]
δ_{cte}	Deslocamento do relógio no chassi na traseira esquerda	[mm]
δ_{ctd}	Deslocamento do relógio no chassi traseira direita	[mm]
δ_{sfe}	Deslocamento do relógio na suspensão frontal esquerda	[mm]
δ_{sfd}	Deslocamento do relógio na suspensão frontal direita	[mm]
δ_{ste}	Deslocamento do relógio na suspensão traseira esquerda	[mm]
δ_{std}	Deslocamento do relógio na suspensão traseira direita	[mm]
α_c	Deformação total do chassi	[grau]
α_s	Deformação total da suspensão	[grau]
α_{cf}	Deformação angular frontal do chassi	[grau]
α_{ct}	Deformação angular traseira do chassi	[grau]
μ	Precisão/Erro associado	
σ	Desvio Padrão	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	1
1.3 OBJETIVO PRINCIPAL	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 TIPOS DE CHASSIS	4
2.2 CARGAS E DEFORMAÇÕES	5
2.3 CONFIGURAÇÕES E CLASSIFICAÇÕES DAS FORMAS DE APLICAÇÃO DE TORQUE.....	6
2.4 LIMITE DE TORQUE.....	6
2.5 EFEITOS ESPERADOS	6
3. ESTUDO DE CASO	7
3.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	7
3.1.1 Adaptações do chassi.....	7
3.1.2 Aplicação da força	8
3.1.3 Cavaletes de suspensão e fixação	9
3.1.4 Relógios comparadores	10
3.2 CÁLCULO PARA OBTER A RIGIDEZ A TORÇÃO E PROPAGAÇÃO DE ERRO	11
4. RESULTADOS	13
4.1 ANÁLISE DE INCERTEZAS E PROPAGAÇÃO DE ERRO	15
5. CONCLUSÃO	15
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
7. APÊNDICE A – Ensaio Na Suspensão Direita	17
8. APÊNDICE B – Rigidez à Torção - Ensaio Na Suspensão Esquerda	18
9. APÊNDICE C – Ensaio na direita com incerteza experimental da rigidez torcional	19
10. APÊNDICE D – Ensaio na esquerda com incerteza experimental da rigidez torcional	20

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

No veículo, o chassi é o principal sistema estrutural, sendo definido como a estrutura base na qual o mesmo é construído. O chassi tem como função conter, apoiar e conectar as outras partes. Se adotarmos a definição de chassi a suspensão, os pneus e o sistema de direção, então passa a ser chamada de “*frame*” (estrutura) (SAMPO, 2011).

Ao realizar as suas funções o chassi está sujeito a diversas cargas: cargas da suspensão traseira; da suspensão dianteira e da direção; do motor, caixa de câmbio e tração final; cargas aerodinâmicas e da carroceria; dos assentos, controles, e outras partes menores (tanque de combustível, bateria, etc) (SAMPO, 2011).

Freqüentemente usam-se como referência do desempenho estrutural do veículo a resistência à flexão e torção. Geralmente, quando um veículo já possui rigidez suficiente, também possui ampla rigidez à flexão. Assim, a resistência à torção representa o principal critério do projeto do chassi e a principal função de um chassi de alto desempenho (SAMPO, 2011).

O programa Baja SAE busca desafiar os alunos de engenharia a praticar os seus conhecimentos e habilidades obtidos ao longo de sua graduação, fazendo os alunos terem contato com situações reais da vida de um engenheiro profissional. Em equipes, os alunos se envolvem em um caso de desenvolvimento de um veículo *off-road* (veículo para locais não pavimentados), monoposto (lugar para um ocupante), desde a sua concepção, projeto detalhado, construção e testes. As equipes têm como objetivo ter seu trabalho aceito por um fabricante fictício para comercializar o veículo. As equipes participantes devem seguir o Regulamento Baja SAE Brasil (RBSB) regido pela SAE Brasil, que é a responsável pelas competições nacionais e regionais no Brasil (FERREIRA, 2011).

Ainda na etapa de projeto, um dos pontos de muita relevância é a redução de massa veicular, que influi na seleção de materiais, equipamentos, e conseqüentemente em segurança e desempenho do veículo. As equipes devem considerar as limitações e parâmetros, como dimensões e material, seguidos de acordo com a RBSB, ainda assim, a estrutura pode ser otimizada, havendo alguma liberdade para configurar a estrutura do tipo *spaceframe* (configuração tubular tridimensional complexa) (FERREIRA, 2011).

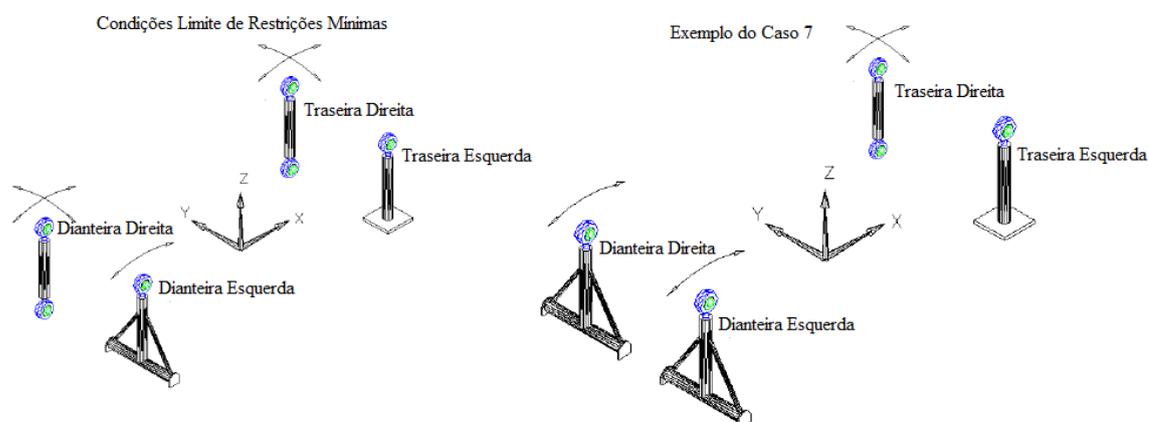
A equipe Tchê de Baja SAE UFRGS ainda não desenvolveu um mecanismo físico capaz de medir a rigidez torcional do chassi do seu veículo. Porém, devido ao excesso de peso do projeto anterior, a equipe determinou a rigidez torcional com análise computacional, pelo Método de Elementos Finitos – MEF (em inglês: Finite Element Method – FEM).

Levando em consideração que simulações podem levar a resultados errados, deve-se ter certeza de que o modelo representa de forma fiel o sistema físico que está sendo modelado (BARBOSA, 2015). O modelo de elementos finitos pode ser validado com um método experimental, capaz de medir diretamente a rigidez torcional (THOMPSON E LAW, 1998).

1.2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

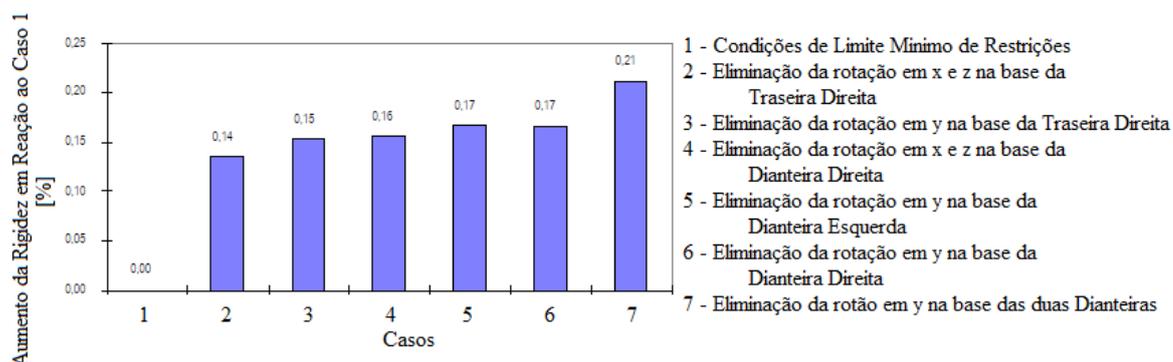
Thompson e Law (1998) realizaram uma análise de elementos finitos em um chassi da Winston Cup para avaliar como os graus de liberdade dos cavaletes usados para fixar o chassi interferem no resultado da rigidez a torção. O chassi foi fixado nas pontas superiores dos cavaletes com junta rotular, permitindo a rotação nos eixos x, y e z, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Condições Limite de Restrições Mínimas (THOMPSON E LAW, 1998).



Na Figura 1 é mostrado um exemplo de como são as restrições aplicadas de forma a eliminar os graus de liberdade na análise de Thompson e Law (1998). Na Figura 2 são considerados todos os casos de sua análise e qual a influência de cada um na rigidez a torção do chassi Hopkins.

Figura 2 – Aumento da rigidez a torção percentual de cada caso em relação às condições de limite de mínimo de restrições. (THOMPSON E LAW, 1998).



Para todos os casos, a diferença percentual é sempre inferior a 0,25% em relação ao caso de limite de mínimo de restrições, possibilitando construir cavaletes mais simples e ainda assim obter resultados confiáveis (THOMPSON E LAW, 1998).

Thompson e Law (1998) também desenvolvem um equipamento que suspende o chassi, sendo portátil, de fácil transporte e adaptável a diferentes chassis, fixando as extremidades traseiras e aplicando deslocamentos verticais (com atuadores lineares de parafuso de rosca) nas extremidades dianteiras. Abaixo dos atuadores são posicionadas balanças de carro de corrida para medir a força aplicada a cada deslocamento. Ele ainda usa relógios comparadores para medir os deslocamentos ao longo do chassi, podendo verificar possíveis trechos mais frágeis do chassi. O valor médio é determinado a partir de um ajuste de mínimos quadrados. E é feita uma análise de incerteza e repetibilidade para determinar a sensibilidade da medição. Também testaram o aparato experimental em um chassi padrão de fácil solução analítica e obtiveram um resultado 6% maior do que a solução analítica.

Riley e George (2002) apresentaram as diferentes cargas a que o chassi é submetido e os principais modos de deformação que as cargas causam. Desenvolveram um modelo matemático simples para comparar a rigidez estrutural com a rigidez da suspensão. Também desenvolveram

um modelo de elementos finitos para o chassi isolado e para veículo (chassi/suspensão). Ainda realizaram um experimento com ênfase no chassi de carro inteiro (com suspensão).

Oliveira (2007) em sua dissertação se utilizou de métodos computacionais para otimizar uma estrutura veicular do tipo *spaceframe*, com o objetivo de reduzir a massa e aumentar a rigidez torcional.

Castro (2008) trabalhou em veículos do tipo monobloco, e desenvolveu uma análise de sensibilidade, que avalia o efeito da variação de alguns parâmetros estruturais, tais como espessura da chapa, forma do perfil e distanciamento das soldas-ponto, com a resposta em termos da rigidez à torção.

Oyama (2009) projetou uma bancada experimental para aplicação de torque puro (sem pivô central na dianteira do chassi), fixando as 4 extremidades do chassi e aplicando força peso conhecida gradualmente. O torque máximo aplicado foi de 1993 N.m e suspeitou ter ocorrido deformação plástica no chassi do Mini Baja, o que sugere muita cautela nos limites de aplicação do torque. O autor ressaltou em seu experimento que pelo fato de o eixo longitudinal do Mini Baja não coincidir com o eixo de torção, houve aplicação de torque em outros planos.

Barbosa (2015) realizou um experimento para obter a rigidez torcional de um chassi Mini Baja da equipe Piratas do Vale, e ainda comparou com uma análise computacional com solução em uma dimensão. No experimento, ele suspendeu o chassi em 3 cavaletes, e na parte superior de cada cavalete traseiro ele aprisionou as extremidades dos eixos com chapas e grampos sargentos, mas não deixou claro os graus de liberdades da fixação.

É importante ressaltar que o estudo de Thompson e Law (1998) lidou com juntas esféricas, que permitem não apenas o giro em seu próprio eixo, como também nos outros dois eixos perpendiculares. No cavalete frontal, Barbosa (2015) deixou o chassi simplesmente apoiado, permitindo livre movimentação de rotação em todos os eixos, e ainda permitindo-o transladar para frente/trás, direita/esquerda. O autor utilizou um nível de água para coincidir o eixo do assoalho do chassi com o eixo de aplicação de torque. Então ele pôs, gradualmente, pesos conhecidos em uma das extremidades dianteiras, e com um relógio comparador em cada uma das 4 extremidades ele aferiu o deslocamento a cada grau de torque aplicado, realizou a colocação e remoção de peso, gradualmente, 3 vezes sucessivas em cada uma das extremidades dianteiras, para que fosse minimizada a histerese em seus resultados. Após isso, utilizou o último resultado de cada extremidade e aplicou regressão linear por mínimos quadrados nos dados obtidos, e análise de incerteza dos instrumentos de medição.

No chassi da Equipe Tchê de Baja SAE já foi feita uma análise de rigidez torcional que consiste em uma simulação numérica sem considerar a estrutura da suspensão, ou seja, foram aplicadas forças opostas (para cima e para baixo) nas extremidades da dianteira do chassi (4 forças em cada lado) nos pontos de fixação da suspensão, enquanto a traseira foi engastada com 4 pontos de fixação (2 em cada lado). Na sua análise computacional foi aplicada uma malha de elementos unidimensionais em toda a estrutura.

É necessário ter em mente que não há um procedimento padrão para medir a rigidez a torção do chassi de maneira experimental. Na literatura encontram-se diferentes trabalhos, com diferentes métodos, que diferem em aspectos como a aplicação do torque, as restrições usadas, análise de resultados, etc, que podem trazer conclusões distintas (BARBOSA, 2015).

Os trabalhos, sejam experimentais ou simulações numéricas, apresentam uma análise apenas do chassi (sem considerar a estrutura da suspensão) ou de veículo interior (considerando a suspensão). O experimento que considera a suspensão é interessante por simular de forma mais aproximada os esforços aplicados a estrutura, porém em nenhum trabalho foram analisadas as deformações que ocorrem apenas no chassi, quando submetido aos esforços que a suspensão causa ao torcê-lo.

1.3 OBJETIVO PRINCIPAL

O presente trabalho tem como objetivo medir a rigidez torcional do chassi da Equipe Tchê de Baja SAE UFRGS utilizando um método experimental.

O trabalho deixa à Equipe Tchê de Baja da UFRGS um conjunto de equipamentos capaz de apurar a rigidez a torção do veículo, de forma adaptável a futuros projetos, ocupando pouco espaço, fator importante considerando o pequeno espaço de trabalho na oficina disponível à equipe.

Para isso é utilizado um mecanismo capaz de torcer o chassi na parte frontal com um torque conhecido, enquanto a parte traseira é fixada de forma conveniente, e as pequenas deformações na parte frontal são mensuradas. Este método, por ser aplicado com o chassi real, fornecerá dados mais confiáveis, indicando se é necessária alguma alteração em uma futura modelagem virtual para que se obtenha resultados mais próximos, permitindo uma otimização mais segura futuramente antes da concepção da estrutura, e a respectiva validação após sua fabricação.

Também é de interesse aplicar o torque no veículo inteiro, considerando a suspensão, porém analisar os efeitos do torque apenas no chassi e também no veículo inteiro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A rigidez à torção é uma propriedade do veículo, e nada mais é do que a deformação angular do chassi em função do torque aplicado, ou seja, quanto menor a deformação do chassi em relação ao torque, maior será a sua rigidez à torção. Então, a propriedade de interesse terá a unidade de $N.m/^\circ$.

2.1 TIPOS DE CHASSIS

Há diversos tipos de chassis, para as mais diversas aplicações, e a rigidez de cada tipo varia em muito apenas pela sua forma típica. Segundo Castro (2008) os chassis são, ou separados da carroceira, ou de carroceria integrada (ex.: monobloco; monocoque; etc). Entre os do tipo separados da carroceira, temos o chassi tipo escada (também chamado “*ladder frame*”), este é composto de duas vigas longitudinais (longarinas), ligadas entre si. O chassi tipo escada proporciona boa resistência à flexão, isto se deve ao fato de se utilizar seções do tipo “C” nas longarinas (o que dificulta a recuperação quando avariada). Porém, possui baixa rigidez a torção por ser praticamente plano (HAPPIAN-SMITH, 2002 apud FURTADO, 2013).

Dos chassis separados da carroceria (Figura 1), além do tipo escada, ainda temos: chassi coluna vertebral, *spaceframe*, etc. O chassi coluna vertebral (também chamado “*backbone chassis*”) é de fácil fabricação, com baixo custo, e boa resistência. Sua estrutura principal é um túnel central bastante robusto em formato retangular (OLIVEIRA, 2007). Este chassi é utilizado em carros esportivos pequenos (CHANDRA et al, 2012 apud FURTADO, 2013).

O chassi do tipo *spaceframe* difere dos chassis anteriores por não permitir uma aproximação bidimensional, com a altura similar ao comprimento e à largura. Essa estrutura é treliçada, permitindo aumentar em muito a sua altura sem um ganho significativo de peso, aumentando a sua rigidez em aspectos gerais (HAPPIAN-SMITH et al, 2002 apud FURTADO, 2013).

Figura 1 – Exemplos de chassis separados da carroceria.



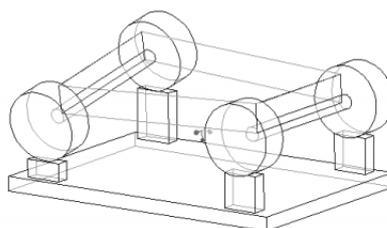
Já os chassis de estrutura integrada têm uma concepção diferente, em estrutura única, que define de modo geral o veículo. A estrutura monocoque é muito eficiente na proteção contra impactos, sendo muito usada em competições de alto nível, com elevada rigidez. A estrutura monobloco é muito utilizada nos carros de passeios atuais, devido seu baixo custo de produção, devido a uma grande adequação aos processos de fabricação por robôs (OLIVEIRA, 2007).

2.2 CARGAS E DEFORMAÇÕES

As cargas a que o chassi é submetido geram deformações na estrutura, as deformações podem ser locais e globais. As locais são as que ocorrem em suportes e acessórios de suspensão, por exemplo, e não são facilmente descritas em alguma classificação geral. As deformações globais podem ser descritas pelos seguintes principais modos de deformação: torção longitudinal, flexão vertical, flexão lateral e horizontal *lozenging* (deformação do chassi em forma de paralelogramo). (SAMAPO, 2011)

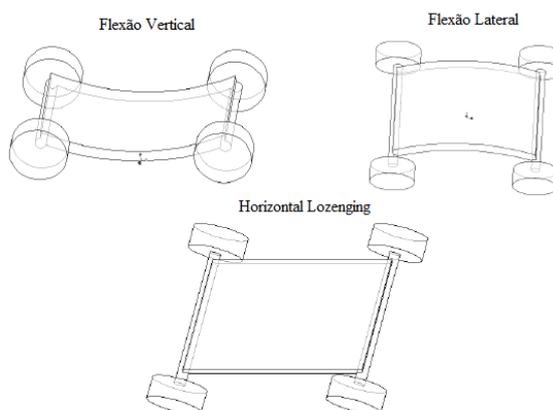
Entre os modos de deformação, busca-se neste trabalho o modo de deformação descrito como torção longitudinal, representado na Figura 3, que resultam de cargas aplicadas que atuam em um ou dois cantos opostos do carro. (RILEY E GEORGE, 2002)

Figura 2 – Modo de deformação por torção longitudinal (RILEY E GEORGE, 2002).



A flexão vertical é causada pelo peso do motorista e dos componentes montados sobre o chassi. A flexão lateral é causada por forças centrífugas causadas pelas curvas da estrada, cargas laterais diversas, como ventos. O modo de deformação chamado de horizontal *lozenging* é causado por forças opostas, para frente e para trás, nas rodas da direita para um sentido e nas da esquerda para o outro, podem ocorrer por variações verticais no pavimento, tendo a deformar o quadro na forma de um paralelogramo. Essas deformações são ilustradas na Figura 3.

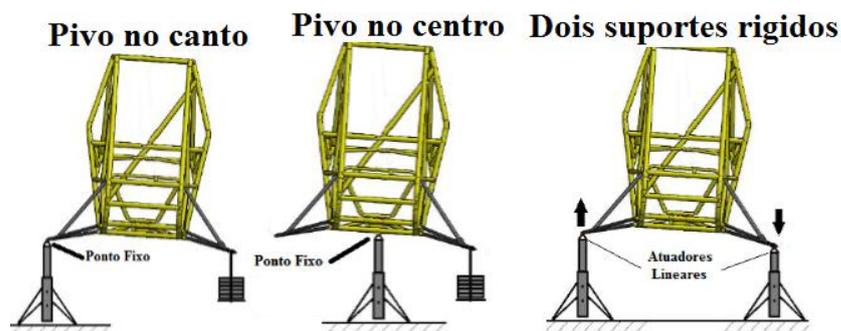
Figura 3 – Modos de deformação: Flexão Vertical, Flexão Horizontal, Horizontal Lozenging (RILEY E GEORGE, 2002).



2.3 CONFIGURAÇÕES E CLASSIFICAÇÕES DAS FORMAS DE APLICAÇÃO DE TORQUE

Cada configuração segue o princípio básico de fixar uma extremidade (no caso a traseira) do chassi e aplicar uma carga na outra (dianteira), para que a torção seja gerada e medida. As duas primeiras configurações utilizam três pontos de apoio, duas rígidas na extremidade traseira e uma articulada na frente, respectivamente, no centro (pivô no centro) ou em alguma extremidade (pivô no canto), enquanto uma força vertical é aplicada na outra extremidade. Na última configuração apenas a traseira é fixada, enquanto a dianteira tem duas forças verticais opostas, gerando um torque (SAMPO, 2011). As configurações podem ser vistas na Figura 4.

Figura 4 – Configurações de aplicação de torque/deslocamento na dianteira.



Barbosa (2015) classifica o experimento de acordo com a variável independente (dado de entrada): ou aplica-se um torque e mensura-se o ângulo de torção (resposta); ou aplica-se um ângulo de torção e mensura-se as forças de reação, calculando-se em seguida o seu torque. Portanto, as variáveis independentes são: torque; e ângulo de torção.

O experimento também pode ser classificado quanto à forma e ao local de aplicação da força ou deslocamento, podendo o ensaio ser (i) feito diretamente no chassi, ou seja, suportes e forças, respectivamente conectados e aplicados no chassi; ou (ii) o ensaio pode ser realizado em massas não suspensas, como os cubos de roda, substituindo-se os amortecedores por barras rígidas. Este último possibilita o ensaio do veículo inteiro (BARBOSA, 2015).

Cada forma do ensaio possui vantagens e desvantagens. Aplicar a carga diretamente no chassi é vantajoso por não implicar a substituição dos amortecedores, evitando possíveis folgas na estrutura da suspensão ou rolamentos. Porém, as forças atuantes no chassi não simulam as cargas reais às quais o veículo é submetido, podendo a rigidez do chassi responder de forma diferente em situações reais. Para resolver este problema, é possível projetar uma estrutura com barras rígidas semelhante à da suspensão, ou remover a maior parte dos componentes móveis e aplicar a carga no local aproximado onde a roda é fixada.

2.4 LIMITE DE TORQUE

Oyama (2009) após aplicação de 1993 N.m de torque, observa que o assoalho do chassi não voltou a permanecer completamente plano, indicando a ocorrência de deformação plástica. Então indica um limite máximo de 678 N.m nos futuros testes. Com isso, Barbora (2015), em seu trabalho, considera um limite máximo de 650 N.m, e não é observada deformação plástica no chassi do Baja da Equipe Piratas do Vale.

2.5 EFEITOS ESPERADOS

Pode ocorrer o efeito de histerese, que é a capacidade do sistema de preservar uma deformação na ausência do estímulo que as gerou. Ao aplicar a carga inicial, toda folga que

houver no sistema é acomodada, ao remover as cargas as acomodações permanecem, e o chassi possivelmente não retorna totalmente ao seu estado inicial, causando diferença de resultado entre medições consecutivas.

3. ESTUDO DE CASO

O protótipo da equipe Tche de Baja é o TB-20, possui caixa de 3 relações mais a ré, telemetria, amortecedores reguláveis com molas pneumáticas, suspensão duplo A dianteiro e traseiro, freio a disco (2 dianteiros e 2 traseiros centrais), com massa aproximada de 165 kg.

O chassi do veículo é do tipo *spaceframe*, com estrutura tubular de aço AISI 1008, com diâmetro externo 25,4 mm e espessura 1,6 mm. O aço AISI 1008 tem densidade de 7,872 g/cm³ e seu módulo de elasticidade num intervalo de 190 GPa a 210 GPa, resistência a tração de 340 MPa, Limite de Escoamento de 285 MPa, Coeficiente de Poisson de 0,27 a 0,30.

Figura 5 – Foto do veículo.



3.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

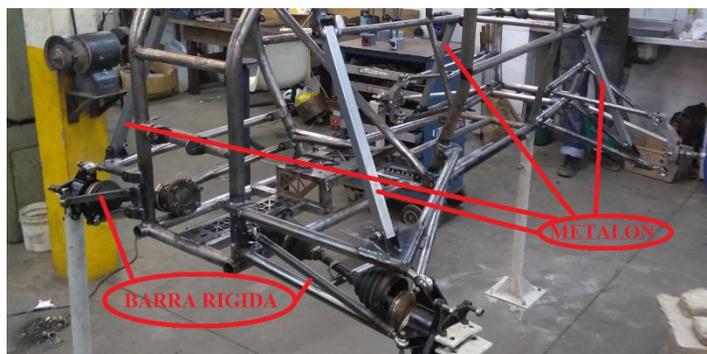
Para obter a propriedade de rigidez a torção do chassi do Baja é utilizada a configuração pivô no centro e como variável independente o torque, aplicando força com massas conhecidas, suspendendo o chassi em 3 cavaletes como no trabalho de Barbosa (2015).

As estruturas dos cavaletes e da haste que suporta os pesos são aproveitadas de escoras metálicas de construção civil. Também são utilizadas chapas de 3 mm fornecidas pelo GMAp da UFRGS, e alguns outros retalhos de ferro comprados em ferro velho, o que minimizou o custo do projeto. As massas também são construídas de forma a reduzir os custos. As estruturas metálicas são soldadas em eletrodo revestido E6013 2,5 mm com um inversor de solda em 100 A. Os 8 relógios comparadores utilizados são emprestados pelos laboratórios da UFRGS: LAMEF e GMAp.

3.1.1 Adaptações do chassi

As suspensões são substituídas por um tubo retangular 400 mm × 25 mm × 1,5 mm, restringindo a movimentação da suspensão. O setor de direção também foi substituído por barra rígida com juntas do tipo *uniball* para evitar que as extremidades da rodas virem. Desta forma podemos aplicar a força em uma estrutura semelhante à usada no veículo inteiro. As adaptações são ilustradas na Figura 6.

Figura 6 – Adaptações feitas no chassi para o experimento.



- 4 Barras de seção quadrada (*Metalon*):
Comprimento: 400 mm
Aresta externa: 25 mm
Espessura: 1,5 mm
- 2 Barra de seção circular:
Comprimento: 400 mm
Diametro externo: 25,4 mm
Espessura: 1,5 mm

3.1.2 Aplicação da força

Dos 3 cavaletes, são dois nas traseiras e um dianteiro central utilizado como pivô, permitindo o giro do chassi. Nas extremidades dianteiras é aplicada uma força peso gradual, com massas conhecidas, e com um braço de alavanca entre o pivô e a haste. Para estipular um limite de torque, Barbosa (2015) baseia-se em trabalhos semelhantes com chassis do tipo Baja, como de Oyama (2009) que recomenda um limite máximo de 678 N.m. Barbosa (2015) considera um limite máximo de 650 N.m, e neste trabalho é considerado um limite conservador de 500 N.m.

As massas são confeccionadas em forma de U para encaixarem-se na haste que suportara os pesos. Elas são feitas em concreto com estrutura de ferro. Os pesos são aferidos em balança de precisão, com selo e lacre do Inmetro, momentos antes de serem usadas para aplicar o torque no chassi.

A haste que suportara as massas é projetada de forma que possa aprisionar a porca no eixo roscado, e com uma articulação que mantém a força aplicada sempre na vertical. A haste de aplicação de força é mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Haste de aplicação de torque com articulação.



As cargas são aplicadas 3 vezes consecutivas para redução da histerese, em cada lado (na extremidade da suspensão esquerda e direita) alternando a haste da posição. Os deslocamentos são verificados a cada colocação/remoção de peso para se obter a deformação angular em função do torque.

das pontas dos eixos. Porém o ideal é a utilização de juntas esféricas. Os cavaletes são ilustrados na Figura 9.

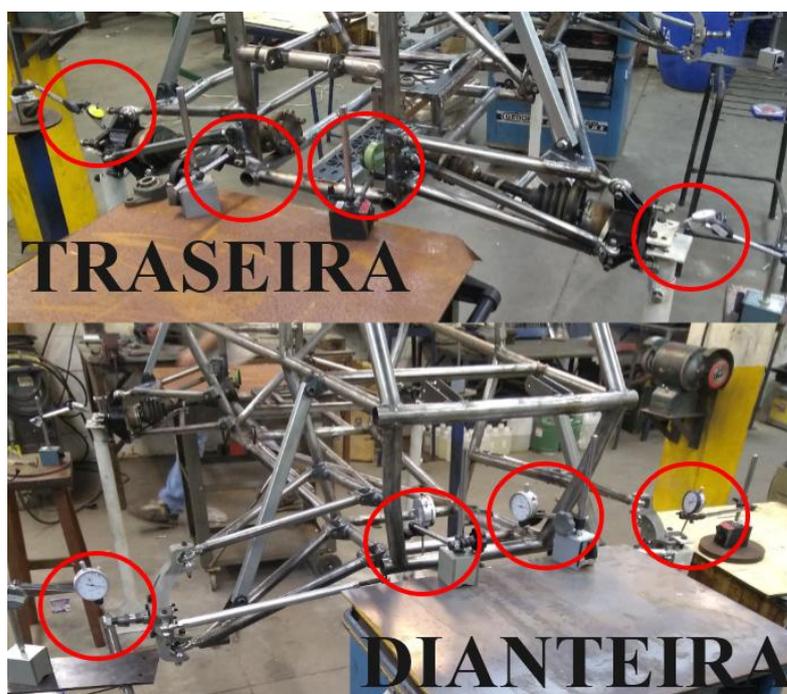
Figura 9 – Bases dos cavaletes e fixações.



3.1.4 Relógios comparadores

Os relógios comparadores são usados para saber qual o deslocamento ocorrerá em cada local de acordo com a aplicação da força peso. Eles são posicionados nas 4 extremidades do chassi, e nas 4 extremidades nas ponteiras das suspensões. Sabendo as distâncias entre os relógios opostos, pode-se calcular a rotação a cada aplicação de torque, tanto no chassi, quanto no veículo inteiro (considerando a suspensão). Obtendo a rotação em função do torque, é possível calcular a rigidez à torção. A posição dos relógios comparadores é ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Posição dos relógios comparadores.



3.2 CÁLCULO PARA OBTER A RIGIDEZ A TORÇÃO E PROPAGAÇÃO DE ERRO

O torque é obtido pela multiplicação das massas M pela gravidade g , e pela multiplicação do braço de alavanca d .

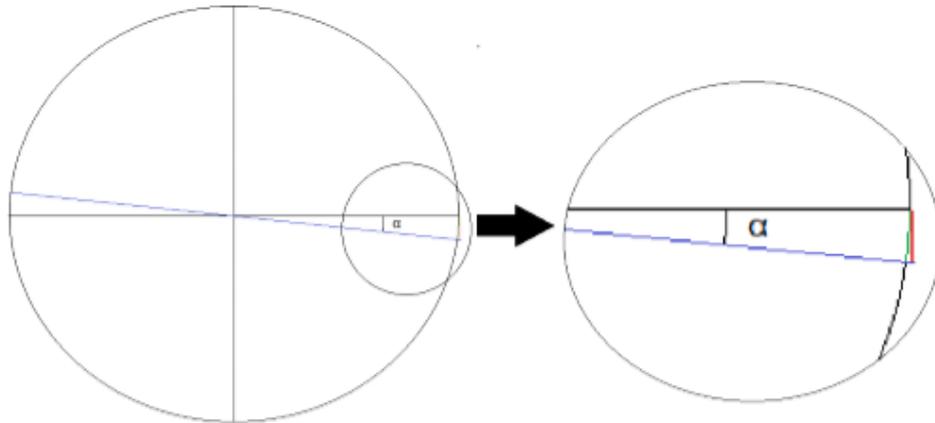
$$T = M \times g \times d \text{ [N.m]} \quad (1)$$

Diferente dos trabalhos e experimentos feitos anteriormente com o objetivo de obter a rigidez a torção, no presente trabalho deseja-se obter a rigidez a torção do chassi e o veículo inteiro, mesmo que a força seja aplicada no local de fixação das rodas. Portanto, utilizar-se-á relógios comparadores nas extremidades frontal e traseira do chassi, e não apenas próximos ao local de aplicação da força, necessitando de 8 relógios comparadores no chassi.

Nas variáveis a seguir, considera-se $i = c$ quando trata-se do chassi, e $i = s$ quando trata-se do veículo inteiro (considerando suspensão).

Para obter o ângulo de torção “ α ”, deve-se subtrair da torção frontal a torção traseira. Os pequenos deslocamentos captados pelos relógios são δ_{ife} (deslocamento frontal esquerdo) e δ_{ifd} (deslocamento frontal direito). Sendo os deslocamentos dos relógios igual à tangente dos do ângulo da rotação ($\text{tg}(\alpha_i) = \delta_i$), e considerando pequenos deslocamentos, é possível aproximar os deslocamentos dos relógios comparadores dos seus respectivos comprimentos de arco (Figura 11). Sendo a distância entre os relógios frontais (D_{if}) o diâmetro desta circunferência. Tirando a média dos ângulos da esquerda e direita temos que o ângulo de torção frontal apenas do chassi será:

Figura 11 – Comprimento de arco da rotação próximo do deslocamento de cada relógio.



$$\alpha_{cf} = \frac{\delta_{ife} + \delta_{ifd}}{D_{if}} \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (2)$$

Analogamente, o deslocamento angular traseiro apenas (α_{it}) será:

$$\alpha_{it} = \frac{\delta_{ite} + \delta_{itd}}{D_{it}} \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (3)$$

Pode-se então determinar o deslocamento angular do total do chassi ou do veículo com suspensão, com a seguinte subtração:

$$\alpha_i = \alpha_{if} - \alpha_{it} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (4)$$

A rigidez a torção do chassi ou de veículo inteiro pode ser obtida dividindo a Equação 1 pela Equação 4:

$$K_i = \frac{T}{\alpha_i} \text{ [N.m/}^\circ\text{]} \quad (5)$$

As 8 variáveis usadas para obter a rigidez a torção, na configuração pivô no centro, são: D_{if} (distância lateral entre os relógios comparadores dianteiros; D_{it} (distância lateral entre relógios comparadores traseiros); d (braço de alavanca); δ_{ifd} (deslocamento vertical do relógio comparador da dianteira direita); δ_{ife} (deslocamento vertical do relógio comparador da dianteira esquerda); δ_{itd} (deslocamento vertical do relógio comparador da traseira direita); δ_{ite} (deslocamento vertical do relógio comparador da traseira esquerda); M (massa dos pesos).

Combinando as Equações anteriores, e pondo a rigidez a torção em evidencia, obtemos:

$$K_i = \frac{M.g.d}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]} \quad (6)$$

A propagação de erro das variáveis da rigidez a torção (μ_K) é calculada da mesma forma que nos trabalhos de Barbosa (2015), pela raiz da soma dos quadrados da multiplicação da derivada parcial de cada variável (∂j) vezes a incerteza da variável (μ_j), como é mostrado na Equação (7), em seguida são calculadas as derivadas parciais da rigidez a torção em função das variáveis (Equação 8 a Equação 15).

$$\mu_K = \sqrt{\sum_j^8 \left(\frac{\partial K_i}{\partial j} \mu_j \right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial M} = \frac{g.d}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]} \quad (8)$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial d} = \frac{g.M}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]} \quad (9)$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial (\delta_{ifd})} = \frac{g.M.d}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]^2 D_{if}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial (\delta_{ife})} = \frac{g.M.d}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]^2 D_{if}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial (\delta_{itd})} = \frac{g.M.d}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]^2 D_{it}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial(\delta_{itd})} = \frac{g.M.d}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]^2 D_{it}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial K_i}{\partial(D_{if})} = \frac{g.M.d.(|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|)}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_t} \right) \right]^2 D_{if}^2} \quad (14)$$

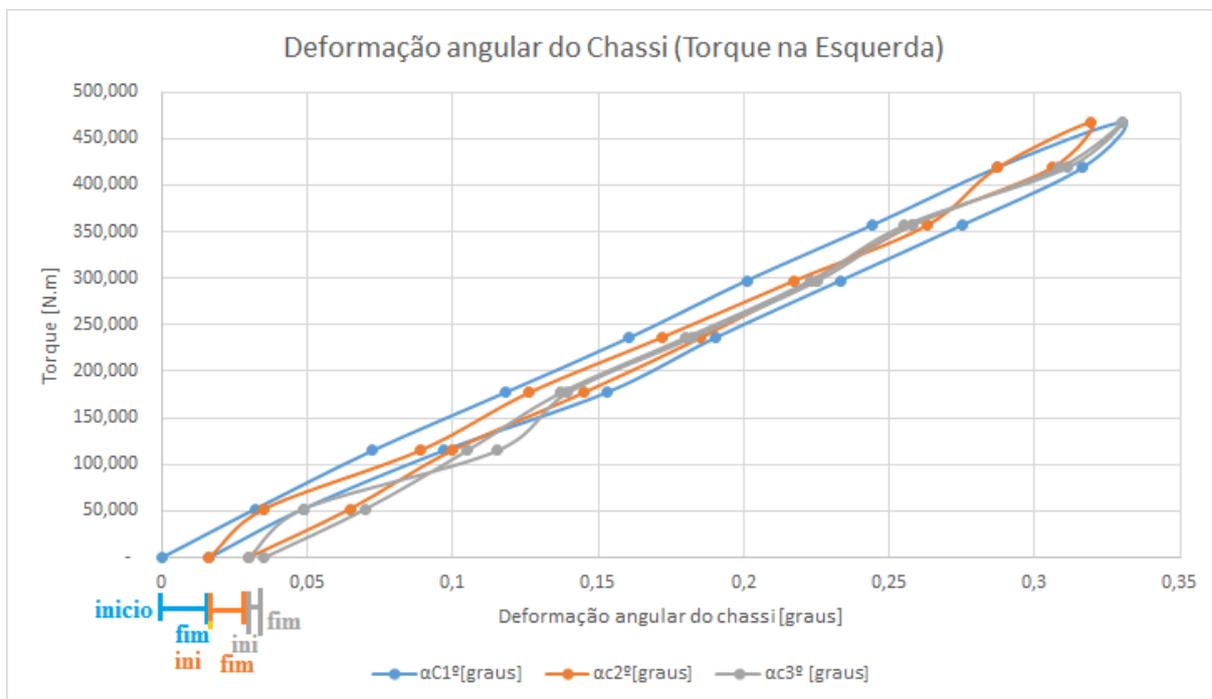
$$\frac{\partial K_i}{\partial(D_{it})} = \frac{g.M.d.(|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|)}{\frac{180}{\pi} \left[\left(\frac{|\delta_{ifd}| - |\delta_{ife}|}{D_{if}} \right) - \left(\frac{|\delta_{itd}| - |\delta_{ite}|}{D_{it}} \right) \right]^2 D_{it}^2} \quad (15)$$

4. RESULTADOS

Todos os dados obtidos de deslocamento dos relógios em função das massas, incluindo as distâncias de interesse, estão tabeladas nos Apêndices A, B, C e D.

Nos ensaios, a variável de entrada é o torque, obtendo assim a deformação angular. Mas para obter diretamente a rigidez a torção no coeficiente angular da função, invertemos os eixos da variável de entrada. É possível observar a histerese sendo reduzida a cada ciclo de ensaios sucessivos na Figura 12. Esse é um efeito já esperado no ensaio, devido a ocorrência nos ensaios feito por Thompson e Law (1998), Barbosa (2015), Oyama (2009), e entre outros trabalhos já mencionados.

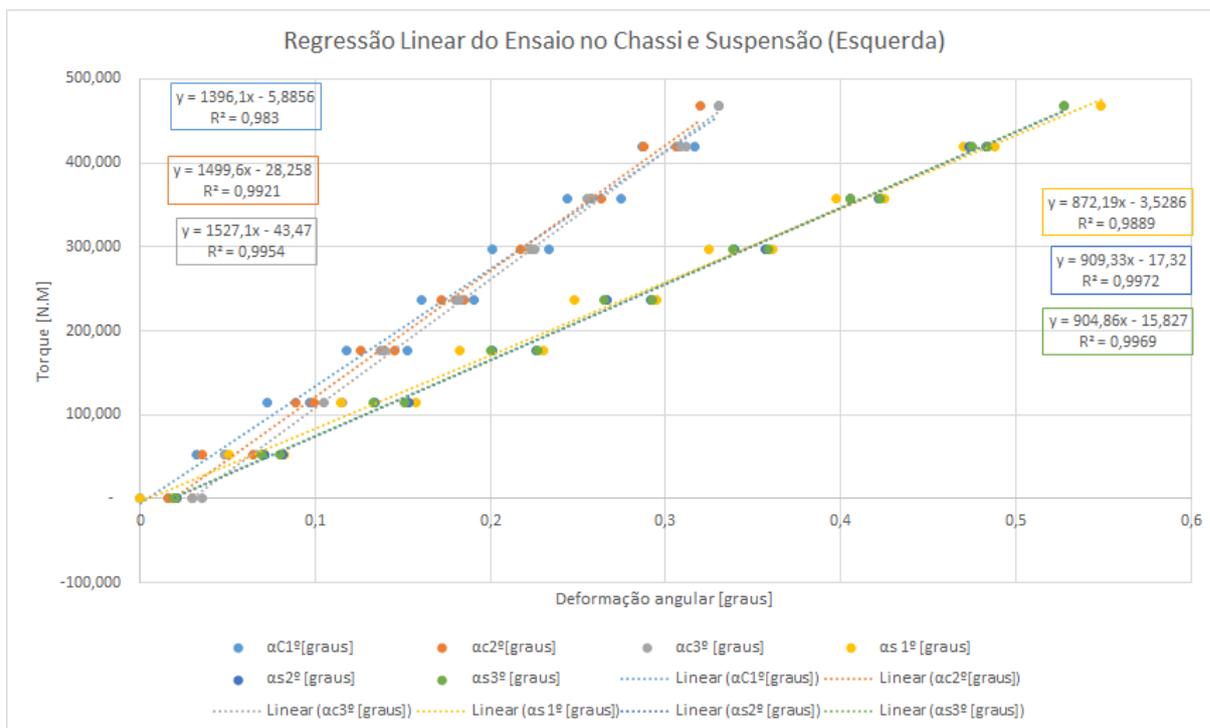
Figura 12 – Redução da histerese em ensaios consecutivos.



A regressão linear é feita pelo método dos mínimos quadrados na ferramenta Excel (2013) da Microsoft Office. Na Figura 13, os coeficientes angulares mostram o valor da rigidez a torção sem a análise de incertezas. A rigidez a torção é muito maior quando é considerada apenas a deformação do chassi sem a estrutura da suspensão, chegando a mais de 1500 N.m/°, este resultado é esperado já que a estrutura apenas do chassi é toda soldada, enquanto na suspensão

há juntas do tipo esféricas e outras conexões. Além disso, a estrutura da suspensão torna-se um componente a mais, com certa flexibilidade, causando maiores deformações. No gráfico ainda é possível observar que a rigidez a torção aumenta à medida que os ensaios sucessivos ocorrem, pois há acomodação das folgas, e em seguida ela estabiliza. Quando considerada a rigidez do veículo inteiro, os valores de rigidez a torção obtidos neste trabalho é um pouco inferior ao trabalho de Barbosa (2015) (15 % inferior) que utiliza a mesma abordagem para um veículo semelhante.

Figura 13 – Regressão Linear dos Ensaios feitos no chassi e suspensão (Torque na Esquerda).



Para minimizar os efeitos da histerese considera-se apenas os últimos dois ensaios de cada abordagem (chassi/veículo inteiro, direita/esquerda). Desta forma é obtida uma amostra de 30 dados de rigidez à torção para cada situação (cada aplicação/remoção de peso gera um dado). Nos Apêndices A e B é calculada a rigidez a torção na direita e esquerda, respectivamente, sem considerar a propagação de erro experimental, com 95 % de confiança ($z = 1,96$). A rigidez para cada abordagem pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Rigidez à torção sem propagação de erro experimental.

Últimos 2 ensaios	Torque na suspensão direita		Torque na suspensão esquerda	
	Rigidez do Chassi	Rigidez do Veículo inteiro	Rigidez do Chassi	Rigidez do Veículo inteiro
Média últimos 2 ensaios	1296	860	1279	829
Tamanho da amostra	30	30	30	30
Desvio padrão	86,75	59,04	177,52	68,63
Variância	15,84	10,78	32,41	12,53
± Erro 95% confiança	31	21	64	25
K [N.m/grau]	1296±31	860±21	1279±64	829±25

Na Tabela 1 a rigidez a torção aplicando o torque na suspensão direita a rigidez é um pouco mais elevada, tanto para o chassi quanto para o veículo inteiro, é esperado que tenha um pouco de diferença, visto que o chassi tem estrutura assimétrica. Ainda assim a diferença é pouco

significativa considerando o erro estatístico associado. Em ambos os casos o chassi apresenta aproximadamente 34% de rigidez à torção mais elevada.

4.1 ANÁLISE DE INCERTEZAS E PROPAGAÇÃO DE ERRO

Os valores de braços de alavanca, e distâncias entre relógios e pivô foram medidas com um trena, e assim como no trabalho de Barbosa (2015) será utilizada uma precisão conservadora de 5 mm, devido à dificuldade de aproximar a trena dos pontos de interesse. As massas foram medidas em balança de precisão com resolução 0,005 g. Os relógios comparadores possuem precisão de 0,01 mm. A propagação de erro foi calculada para cada aplicação de torque em cada 2º e 3º ensaio utilizando as Equações de (6) a (15). Em seguida é feita a média da incerteza de cada incremento de torque, os resultados estão nos Apêndices C e D. O valor obtido de incerteza experimental é somado à incerteza estatística de cada 2º e 3º ensaio e exibido na Tabela 2.

Tabela 2 – Rigidez à torção com análise de incerteza experimental e estatística.

Rigidez à torção com erro estatístico + erro experimental						
Torque na suspensão direita			Torque na suspensão esquerda			
ÚLTIMOS 2 ENSAIOS	Rigidez [N.m/grau]	Erro Absoluto	Erro	Rigidez [N.m/grau]	Erro Absoluto	Erro %
Apenas chassi	1296	±65	5%	1279	±96	8%
Veículo inteiro	860	±37	4%	829	±49	6%

Por fim, a rigidez a torcional do veículo apresenta pouca variação com o sentido de aplicação do torque. O veículo inteiro, se aplicado o torque no sentido anti-horário (tendo o piloto como observador) possui uma rigidez de 829 ± 49 N.m/°, se aplicado no sentido horário 860 ± 37 N.m/°. Porém, apenas o chassi possui 1279 ± 96 N.m/° se aplicado torque em sentido anti-horário, e 1296 ± 65 se aplicado no sentido horário, considerando os esforços sendo aplicados nas extremidade da suspensão. Ainda na Tabela 2, se considerarmos os valores médios de rigidez, aplicando o torque no sentido anti-horário, a rigidez do chassi é 35,18 % mais elevada que do veículo inteiro, e no sentido horário 33,64 % mais elevada.

5. CONCLUSÃO

O trabalho permitiu estimar a rigidez a torção em diversas condições do veículo da Equipe Tchê de Baja da UFRGS, oferecendo-lhes um método adaptável a futuros projetos de chassis, ocupando pouco espaço de sua oficina ao ser armazenado.

Os resultados obtidos com 95% de confiança e com a propagação de erro experimental, variou de 8 % a 4 % da média dos valores de rigidez dependendo de quais condições de aplicação de torque e deslocamento se consideram.

Através da abordagem utilizada, foi possível identificar que quando o veículo sofre esforços na estrutura da suspensão, apenas o chassi (sem a suspensão) se comporta de forma muito mais rígida do que considerando a estrutura do veículo inteiro.

Em trabalhos futuros, pode-se analisar se as condições de torque utilizadas neste trabalho produzem efeitos em outros eixos, além do eixo longitudinal do veículo, e qual a influência desses esforços no desempenho estrutural do veículo.

Analisar muitos pontos do veículo exige um grande esforço e muita atenção, é importante que futuros ensaios, com muitos pontos de interesse sejam realizados em equipe, não apenas para facilitar o trabalho, mas para garantir a correta leitura dos dados. Com maiores recursos e equipamentos, é possível analisar pontos ao longo do eixo longitudinal do chassi, identificando trechos de fragilidade e auxiliando na otimização do projeto estrutural.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, L. F. F. M. **Avaliação da Rigidez Torcional do Chassi de Um Protótipo BAJA SAE Através do Método de Elementos Finitos e de Ensaio Experimental**. Guaratinguetá, 2015. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139256/000865419.pdf?sequence=1>.
Acessado em 22/05/2020.

CASTRO, Márcio Schneider de. **Uma metodologia para melhoria da rigidez torcional de componentes estruturais automotivos**; 2008. 129f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/91536>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

FERREIRA, E.G. **Influências do Projeto Baja SAE no Ensino da Engenharia e no Desenvolvimento do Aluno**. Guaratinguetá, 2011. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/119038/ferreira_eg_tcc_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acessado em 24 de junho de 2020.

FURTADO, C. **Análise Estrutural de Chassi de Veículos Automotivos** Universidade de Brasília, FGA, Curso de Engenharia Automotiva, 2013. https://www.bdm.unb.br/bitstream/10483/7113/1/2013_DanielCanongiaFurtado.pdf. Acessado em 22/05/2020.

OLIVEIRA, Fernando César Gama de; BORGES, José Antônio Ferreira. Avaliação da rigidez torsional de uma estrutura veicular tipo space frame pelo Método de Elementos Finitos com estudo de caso. In: **SÍMPOSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**, 16. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006. Disponível em: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/16/>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

OYAMA, Daniel; **Torsion Fixture Final Design Report**. In: Interdisciplinary Design Project MECH-499, Prof. Timothy Lee. Montreal, McGill University. 2009. Disponível em: <http://forums.bajasae.net/forum/uploads/179/Torsion_Rig.pdf>. Acesso: 15 julho. 2020
Sampo, E. **Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation**. University of Surry, 2011.

RILEY, William B.; GEORGE, Albert R.; **Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis**. SAE Technical Paper Series 2002-01-3300, 2002.

SAMPÒ, Enrico. Vehicle chassis and vehicle dynamics. In: __. **Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation**. 2011. Dissertação (Doutorado) - Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford, 2011. Disponível em: <<http://core.ac.uk/download/pdf/16517785.pdf>>. Acesso em: 4 out. 2020

THOMPSON, Lonny L; LAMPERT, Jon; LAW, E. Harry; **Design of a Twist Test Fixture to Measure Torsional the Torsional Stiffness of a Winston Cup Chassis**. SAE Technical Paper Series 983054, 1998.

7. APÊNDICE A – Ensaio Na Suspensão Direita

			Dfc	Dfs	Dtc	Dts		
BA [m]	0,675	DR [m]:	0,21	1,35	0,221	1,225		
	M [kg]	Torque [N.m]	αc1º [graus]	αc2º [graus]	αc3º [graus]	αs1º [graus]	αs2º [graus]	αs3º [graus]
Haste+Prato	3,500	-	0,000	0,009	0,004	0,000	0,012	0,013
Colocando	7,995	52,94	0,041	0,048	0,043	0,050	0,062	0,064
	9,600	116,51	0,091	0,095	0,089	0,121	0,126	0,128
	9,565	179,85	0,133	0,142	0,136	0,187	0,191	0,193
	9,065	239,87	0,178	0,189	0,184	0,251	0,255	0,257
	9,385	302,02	0,231	0,233	0,231	0,321	0,325	0,325
	9,105	362,31	0,275	0,278	0,273	0,390	0,393	0,396
	9,485	425,12	0,305	0,294	0,300	0,521	0,518	0,512
Removendo	7,430	474,32	0,346	0,323	0,346	0,575	0,575	0,577
	7,430	425,12	0,310	0,313	0,313	0,527	0,528	0,529
	9,485	362,31	0,258	0,258	0,256	0,464	0,464	0,466
	9,105	302,02	0,232	0,229	0,232	0,342	0,341	0,344
	9,385	239,87	0,192	0,195	0,190	0,274	0,275	0,276
	9,065	179,85	0,145	0,148	0,148	0,207	0,208	0,211
	9,565	116,51	0,095	0,090	0,096	0,136	0,140	0,140
	9,600	52,94	0,048	0,046	0,046	0,073	0,071	0,071
	7,995	0	0,009	0,004	0,010	0,012	0,013	0,014
		Kdc1º	Kdc2º	Kdc3º	Kds1º	Kds2º	Kds3º	
Torque Máx.	497,4921		1280,84	1108,93	1244,05	1049,56	852,96	824,346
			1276,70	1232,52	1304,04	961,13	927,38	911,518
			1348,11	1268,96	1318,46	962,55	940,03	929,561
			1348,55	1270,59	1305,51	954,93	939,30	932,977
			1310,11	1294,03	1307,80	941,55	930,56	928,135
			1316,20	1303,28	1327,39	928,19	921,18	914,275
			1395,14	1445,62	1419,29	816,54	821,22	830,070
			1371,21	1470,39	1371,21	824,35	824,35	822,529
			1369,99	1358,64	1358,05	807,32	804,73	804,083
			1402,50	1403,24	1417,47	781,24	781,24	776,973
			1303,20	1317,94	1302,44	882,11	886,51	877,762
			1246,30	1228,88	1263,32	875,19	872,59	869,903
			1236,86	1214,08	1212,97	870,51	863,41	852,986
			1220,24	1290,32	1216,78	855,56	830,88	832,219
			1093,38	1155,24	1155,24	724,20	750,00	741,755
		Desvio Padrão	80,791	99,938	74,434	84,911	60,777	59,186
		MÉDIA	1301,29	1290,85	1301,60	882,33	863,09	856,61
		Tamanho Amostra	15	15	15	15	15	15
		Variância	20,860	25,804	19,219	21,924	15,693	15,282
		95% de confiança ±	41	51	38	43	31	30
		K [N.m/grau]	1301,29±41	1290,85±51	1301,60±38	882,33±43	863,09±31	856,61±30
Últimos 2 ensaios			Rigidez do Chassi			Rigidez do Veículo inteiro		
		Média utimos 2 ensaios	1296			860		
		Tamanho da amostra	30			30		
		Desvio padrão	86,75			59,04		
		Variância	15,84			10,78		
		± Erro 95% confiança	31			21		
		K [N.m/grau]	1296±31			860±21		
αc1º		deformação angular do chassi no primeiro ensaio	Kec1º			rigidez torcional do chassi no primeiro ensaio		
αc2º		deformação angular do chassi no segundo ensaio	Kec2º			rigidez torcional do chassi no segundo ensaio		
αc3º		deformação angular do chassi no terceiro ensaio	Kec3º			rigidez torcional do chassi no terceiro ensaio		
αs1º		deformação angular da suspensão no primeiro ensaio	Kes1º			rigidez torcional da suspensão no primeiro ensaio		
αs2º		deformação angular da suspensão no segundo ensaio	Kes2º			rigidez torcional da suspensão no segundo ensaio		
αs3º		deformação angular da suspensão no terceiro ensaio	Kes3º			rigidez torcional da suspensão no terceiro ensaio		
DR		distância entre relógios	BR			braço de alavanca		

8. APENDICE B – Rigidez à Torção - Ensaio Na Suspensão Esquerda

BA [m]	0,665	DR [m]	Dfc	Dfs	Dtc	Dts		
M [Kg]	Torque [N.m]	$\alpha c1^\circ$ [graus]	$\alpha c2^\circ$ [graus]	$\alpha c3^\circ$ [graus]	$\alpha s1^\circ$ [graus]	$\alpha s2^\circ$ [graus]	$\alpha s3^\circ$ [graus]	
Haste+Prato	3,500	-	0	0,016	0,030	0,000	0,021	0,020
Colocando	7,995	52,157	0,03	0,035	0,049	0,050	0,071	0,069
	9,600	114,784	0,07	0,089	0,115	0,114	0,134	0,134
	9,565	177,182	0,12	0,126	0,140	0,182	0,201	0,201
	9,065	236,319	0,16	0,172	0,183	0,248	0,267	0,265
	9,385	297,544	0,20	0,218	0,226	0,325	0,339	0,338
	9,105	356,942	0,24	0,263	0,258	0,397	0,406	0,405
	9,485	418,818	0,29	0,287	0,309	0,470	0,473	0,475
7,430	467,289	0,33	0,320	0,330	0,549	0,528	0,527	
Removendo	7,430	418,818	0,32	0,306	0,311	0,488	0,483	0,484
	9,485	356,942	0,28	0,258	0,255	0,425	0,422	0,423
	9,105	297,544	0,23	0,223	0,223	0,361	0,357	0,359
	9,385	236,319	0,19	0,185	0,180	0,295	0,291	0,293
	9,065	177,182	0,15	0,145	0,137	0,230	0,226	0,227
	9,565	114,784	0,10	0,100	0,105	0,157	0,153	0,151
	9,600	52,157	0,05	0,065	0,070	0,083	0,081	0,080
7,995	-	0,016278923	0,030	0,035	0,021	0,020	0,019	
Torque Máx.	490,1218		Kc1º	Kc2º	Kc3º	Ks1º	Ks2º	Ks3º
			1619,97	1480,76	1072,75	1033,36	736,54	754,63
			1585,70	1294,56	994,77	1002,52	853,98	859,41
			1501,80	1403,27	1269,32	971,73	881,45	883,32
			1469,32	1375,09	1294,78	952,44	885,98	891,77
			1480,12	1367,87	1319,38	915,96	877,17	879,37
			1462,28	1356,60	1384,64	898,30	879,58	880,57
			1458,79	1457,69	1357,00	890,74	885,21	881,92
			1415,60	1462,17	1414,67	851,72	885,33	885,98
			1323,34	1368,17	1344,75	858,89	866,61	865,03
			1297,97	1383,87	1397,52	839,27	846,15	844,45
			1275,40	1334,29	1333,86	823,58	832,54	829,58
			1240,92	1275,15	1311,85	801,96	811,39	807,86
			1159,26	1221,41	1290,61	769,69	782,79	781,32
			1185,72	1151,44	1093,75	729,73	748,04	758,54
			1074,34	806,36	744,20	630,95	641,07	654,73
		Desvio Padrão	161,6015	166,8161	185,7186	106,6998	71,9074	67,6888
		Amostra	15	15	15	15	15	15
		Média	1370,03	1315,91	1241,59	864,72	827,59	830,57
		Variância	41,7253	43,0717	47,9523	27,5498	18,5664	17,4772
		95% de confiança ±	82	84	94	54	36	34
		K [N.m/grau]	1370±82	1316±84	1242±94	864±54	828±36	831±34
Últimos 2 ensaios			Rigidez do Chassi			Rigidez do Veiculo inteiro		
		Média utimos 2 ensaios	1279			829		
		Tamanho da amostra	30			30		
		Desvio padrão	177,52			68,63		
		Variância	32,41			12,53		
		± Erro 95% confiança	64			25		
		K [N.m/grau]	1279±64			829±25		
$\alpha c1^\circ$	deformação angular do chassi no primeiro ensaio				$Kec1^\circ$	rigidez torcional do chassi no primeiro ensaio		
$\alpha c2^\circ$	deformação angular do chassi no segundo ensaio				$Kec2^\circ$	rigidez torcional do chassi no segundo ensaio		
$\alpha c3^\circ$	deformação angular do chassi no terceiro ensaio				$Kec3^\circ$	rigidez torcional do chassi no terceiro ensaio		
$\alpha s1^\circ$	deformação angular da suspensão no primeiro ensaio				$Kes1^\circ$	rigidez torcional da suspensão no primeiro ensaio		
$\alpha s2^\circ$	deformação angular da suspensão no segundo ensaio				$Kes2^\circ$	rigidez torcional da suspensão no segundo ensaio		
$\alpha s3^\circ$	deformação angular da suspensão no terceiro ensaio				$Kes3^\circ$	rigidez torcional da suspensão no terceiro ensaio		
DR	distancia entre relógios				BR	braço de alavanca		

9. APENDICE C – Ensaio na direita com incerteza experimental da rigidez torcional

Torque na Direita			Dianteira				Traseira				Distancia entre relógios [m]:	
Braço de alavanca [m] 0,675	DR [m]:		Chassi		Suspensão		Chassi		Suspensão		Chassi frontal:	
	M [kg]	T [N.m]	Esq [mm]	Dir [mm]	Esq [mm]	Dir [mm]	Esq [mm]	Dir [mm]	Esq [mm]	Dir [mm]	Suspensão frontal:	0,21
Haste	3,500	-	DESCEU	SUBIU	DESCEU	SUBIU	DESCEU	SUBIU	DESCEU	PARADO	Chassi traseira:	0,221
Colocando	7,995	52,16	0,05	0,13	0,420	0,79	0,02	0,01	0,02	0	Suspensão traseira:	1,255
1º ENSAIO	9,600	114,78	0,07	0,35	1,12	1,79	0,06	0,03	0,05	0	Incertezas (m):	
	9,565	177,18	0,07	0,59	1,69	2,82	0,11	0,07	0,1	0	Relógios:	0,00001
	9,065	236,32	0,09	0,79	2,28	3,8	0,15	0,09	0,15	0	Trena:	0,005
	9,385	297,54	0,11	1,02	2,88	4,85	0,19	0,11	0,16	0	massa [kg]	0,005
	9,105	356,94	0,16	1,21	3,51	5,87	0,26	0,12	0,17	0	ERRO EXPERIMENTAL	
	9,485	418,82	0,31	1,51	4,91	7,54	0,16	0,08	0,17	0	2º E 3º ENSAIO	
	7,430	467,29	0,34	1,65	5,4	8,34	0,16	0,6	0,17	0	Chassi	Suspensão
Removendo	7,430	418,82	0,25	1,6	4,9	7,69	0,16	0,59	0,17	0	48,76	26,37077516
1º ENSAIO	9,485	356,94	0,17	1,48	4,3	6,81	0,16	0,58	0,17	0	19,43	17,73017751
	9,105	297,54	-0,01	1,23	2,94	5,31	0,33	0,06	0,17	0	10,18	10,97264154
	9,385	236,32	-0,09	1,09	2,29	4,34	0,2	0,11	0,16	0	6,38	7,42137014
	9,065	177,18	-0,15	0,93	1,62	3,42	0,15	0,11	0,16	0	5,01	5,625697229
	9,565	114,78	-0,22	0,76	0,96	2,41	0,11	0,09	0,15	0	4,08	4,343067792
	9,600	52,16	-0,26	0,58	0,35	1,48	0,06	0,09	0,1	0	10,29	3,912201772
	7,995	0	-0,28	0,4	-0,16	0,51	0,02	0,07	0,06	0	5,59	2,611719081
Colocando	7,995	52,16	-0,21	0,48	0,34	1,23	0,05	0,05	0,1	0	6,41	2,872288157
2º ENSAIO	9,600	114,78	-0,15	0,62	0,95	2,15	0,08	0,05	0,13	0	8,59	4,294614365
	9,565	177,18	-0,1	0,8	1,57	3,11	0,12	0,07	0,16	0	3,68	4,780188176
	9,065	236,32	-0,05	0,97	2,17	4,03	0,16	0,08	0,17	0	5,81	5,941817089
	9,385	297,54	0	1,15	2,8	5,03	0,2	0,11	0,17	0	8,03	7,228872556
	9,105	356,94	0,07	1,31	3,45	6	0,27	0,11	0,17	0	16,16	12,30610391
	9,485	418,82	0,23	1,57	4,8	7,58	0,16	0,6	0,17	0	42,81	20,76044428
	7,430	467,29	0,27	1,72	5,34	8,4	0,26	0,59	0,17	0	404,40	144,0650777
Removendo	7,430	418,82	0,19	1,66	4,87	7,76	0,16	0,58	0,17	0	48,76	22,28281935
2º ENSAIO	9,485	356,94	0,11	1,53	4,24	6,87	0,16	0,57	0,17	0	19,43	16,10099188
	9,105	297,54	-0,07	1,29	2,9	5,31	0,33	0,07	0,17	0	10,13	10,17352201
	9,385	236,32	-0,15	1,16	2,25	4,41	0,2	0,11	0,17	0	6,41	6,910832289
	9,065	177,18	-0,21	1	1,59	3,49	0,16	0,1	0,16	0	4,96	5,219301979
	9,565	114,78	-0,28	0,82	0,93	2,46	0,12	0,1	0,08	0	3,59	4,095415475
	9,600	52,16	-0,33	0,65	0,31	1,45	0,08	0,08	0,09	0	8,61	4,240011103
	7,995	0	-0,35	0,46	-0,21	0,57	0,04	0,06	0,06	0	5,99	2,569930759
Colocando	7,995	52,16	-0,27	0,54	0,31	1,3	0,06	0,06	0,09	0	5,82	2,759705439
3º ENSAIO	9,600	114,78	-0,21	0,68	0,92	2,21	0,09	0,06	0,11	0	7,67	4,186361935
	9,565	177,18	-0,16	0,85	1,55	3,17	0,13	0,07	0,15	0	3,74	4,401343516
	9,065	236,32	-0,1	1,03	2,14	4,09	0,17	0,1	0,16	0	5,79	5,583022667
	9,385	297,54	-0,06	1,22	2,76	5,09	0,21	0,12	0,17	0	8,07	6,972968563
	9,105	356,94	0	1,39	3,44	6,08	0,29	0,12	0,17	0	15,28	10,39683041
	9,485	418,82	0,18	1,64	4,8	7,45	0,16	0,6	0,17	0	42,81	18,31399393
	7,430	467,29	0,22	1,77	5,34	8,43	0,16	0,6	0,17	0	273,13	105,5926314
Removendo	7,430	418,82	0,15	1,71	4,84	7,8	0,16	0,59	0,17	0	Média	
3º ENSAIO	9,485	356,94	0,06	1,58	4,25	6,92	0,16	0,58	0,17	0	33,62	15,97
	9,105	297,54	-0,11	1,34	2,88	5,41	0,32	0,08	0,17	0		
	9,385	236,32	-0,2	1,2	2,22	4,46	0,21	0,11	0,17	0		
	9,065	177,18	-0,26	1,06	1,6	3,54	0,16	0,11	0,16	0		
	9,565	114,78	-0,32	0,88	0,93	2,53	0,12	0,1	0,15	0		
	9,600	52,16	-0,37	0,69	0,3	1,5	0,08	0,08	0,11	0		
	7,995	0	-0,4	0,53	-0,22	0,63	0,04	0,06	0,08	0		

10. APENDICE D – Ensaio na esquerda com incerteza experimental da rigidez torcional

Torque na Esquerda			Dianteira				Traseira				Distancia entre relógios [m]:	
Braço de alavanca [m]	M [kg]	DR [m]:	Chassi		Suspensão		Chassi		Suspensão		Chassi frontal:	
		T [N.m]	Esq [mm]	Dir [mm]	Esq [mm]	Dir [mm]	Esq [mm]	Dir [mm]	Esq [mm]	Dir [mm]	Suspensão frontal:	
0,665												0,215
												1,35
												0,221
												1,255
Haste	3,500	-	DESCEU	SUBIU	DESCEU	SUBIU	DESCEU	SUBIU	DESCEU	PARADO		
Colocando	7,995	52,16	0,12	0,03	0,690	0,51	0,03	0	0,01	0		
1º ENSAIO	9,600	114,78	0,28	0,05	1,59	1,14	0,06	0	0,03	0	Incertezas (m):	
	9,565	177,18	0,44	0,1	2,55	1,8	0,09	0,01	0,05	0	Relógios:	0,00001
	9,065	236,32	0,61	0,12	3,46	2,44	0,13	0	0,05	0	Trena:	0,005
	9,385	297,54	0,79	0,12	4,53	3,21	0,11	0,05	0,08	0	massa [kg]	0,005
	9,105	356,94	0,96	0,17	5,56	3,91	0,17	0,05	0,1	0		
	9,485	418,82	1,18	0,16	6,64	4,6	0,23	0,04	0,15	0		
	7,430	467,29	1,34	0,21	7,59	5,52	0,28	0,04	0,17	0		
Removendo	7,430	418,82	1,27	0,19	7,04	4,6	0,26	0,02	0,14	0		
1º ENSAIO	9,485	356,94	1,15	0,12	6,2	3,95	0,22	0,2	0,12	0		
	9,105	297,54	1,01	0,06	5,32	3,3	0,18	0,02	0,1	0		
	9,385	236,32	0,88	0	4,4	2,64	0,14	0,03	0,09	0		
	9,065	177,18	0,75	-0,05	3,51	2	0,1	0,03	0,08	0		
	9,565	114,78	0,58	-0,1	2,48	1,28	0,09	0,03	0,05	0	ERRO EXPERIMENTAL	
	9,600	52,16	0,4	-0,14	1,43	0,55	0,08	0	0,03	0	2º E 3º ENSAIO	
	7,995	0	0,24	-0,14	0,54	-0,03	0,06	-0,02	0,01	0	Chassi	Suspensão
Colocando	7,995	52,16	0,34	-0,13	1,19	0,5	0,09	-0,01	0,02	0	201,22	57,55864124
2º ENSAIO	9,600	114,78	0,5	-0,07	2,07	1,14	0,12	-0,02	0,04	0	42,76	39,4938846
	9,565	177,18	0,66	-0,05	3	1,79	0,16	-0,02	0,05	0	23,74	23,3717415
	9,065	236,32	0,81	0,01	3,91	2,45	0,19	-0,01	0,07	0	14,80	15,60007564
	9,385	297,54	0,97	0,07	4,91	3,19	0,18	0,05	0,1	0	10,69	12,05785485
	9,105	356,94	1,11	0,14	5,84	3,84	0,22	0,05	0,11	0	10,06	8,719836008
	9,485	418,82	1,3	0,07	6,8	4,52	0,25	0,05	0,16	0	7,48	7,361592974
	7,430	467,29	1,43	0,1	7,59	5,04	0,29	0,05	0,18	0	5,55	4,69714688
Removendo	7,430	418,82	1,35	0,11	7,04	4,53	0,27	0,05	0,17	0	6,01	4,802922365
2º ENSAIO	9,485	356,94	1,21	0,04	6,21	3,88	0,24	0,05	0,14	0	7,96	6,907475815
	9,105	297,54	1,09	-0,01	5,31	3,24	0,2	0,05	0,12	0	8,02	8,228641625
	9,385	236,32	0,95	-0,06	4,4	2,57	0,15	0,05	0,1	0	10,10	10,62690005
	9,065	177,18	0,82	-0,12	3,5	1,93	0,11	0,05	0,09	0	13,03	13,85164709
	9,565	114,78	0,65	-0,13	2,48	1,2	0,1	0,05	0,06	0	22,47	21,20561082
	9,600	52,16	0,47	-0,13	1,45	0,51	0,08	0,02	0,04	0	56,48	38,63012896
	7,995	0	0,31	-0,13	0,57	-0,09	0,06	0,01	0,01	0	201,11	116,3528449
Colocando	7,995	52,16	0,41	-0,14	1,2	0,45	0,09	0	0,02	0	108,40	48,53162911
3º ENSAIO	9,600	114,78	0,67	-0,13	2,1	1,09	0,12	-0,01	0,04	0	27,14	33,30880039
	9,565	177,18	0,73	-0,07	3,04	1,74	0,16	-0,02	0,05	0	20,11	20,18691566
	9,065	236,32	0,87	-0,01	3,93	2,4	0,19	-0,01	0,08	0	12,84	14,39126761
	9,385	297,54	1,03	0,04	4,94	3,14	0,18	0,05	0,1	0	9,12	10,98950871
	9,105	356,94	1,18	0,05	5,88	3,8	0,22	0,05	0,12	0	7,77	8,149180904
	9,485	418,82	1,35	0,1	6,86	4,48	0,25	0,05	0,14	0	7,29	6,622086799
	7,430	467,29	1,48	0,1	7,61	5	0,29	0,06	0,17	0	5,14	4,445005314
Removendo	7,430	418,82	1,38	0,1	7,08	4,5	0,26	0,06	0,16	0	5,50	4,507017744
3º ENSAIO	9,485	356,94	1,24	0,02	6,27	3,84	0,23	0,08	0,14	0	6,90	6,355278156
	9,105	297,54	1,12	-0,03	5,38	3,2	0,18	0,08	0,12	0	7,15	7,417740477
	9,385	236,32	0,98	-0,09	4,46	2,54	0,14	0,08	0,1	0	9,18	9,644218279
	9,065	177,18	0,83	-0,13	3,55	1,89	0,1	0,09	0,09	0	11,28	12,35525047
	9,565	114,78	0,67	-0,14	2,48	1,15	0,09	0,05	0,06	0	20,85	19,60163839
	9,600	52,16	0,51	-0,14	1,47	0,45	0,07	0,04	0,04	0	39,22	32,64140973
	7,995	0	0,35	-0,14	0,6	-0,13	0,05	0,03	0,02	0	96,54	127,3514818
										Média	32,37	23,62