



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS DE SOUSA GURGEL GUERRA

**DETERMINAÇÃO DE RIGIDEZ TORCIONAL DE MOLA APLICADA EM
CAMBIO CVT DE PROTÓTIPO BAJA**

CARAÚBAS- RN

2018

LUCAS DE SOUSA GURGEL GUERRA

**DETERMINAÇÃO DE RIGIDEZ TORCIONAL DE MOLA APLICADA EM
CAMBIO CVT DE PROTÓTIPO BAJA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Departamento de ciências
naturais e exatas da Universidade Federal
Rural do semiárido, como requisito para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Msc. ANDERSSON
GUIMARÃES OLIVEIRA

CARAÚBAS- RN

2018

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G934d Guerra, LUCAS DE SOUSA GURGEL.
DETERMINAÇÃO DE RIGIDEZ TORCIONAL DE MOLA
APLICADA EM CAMBIO CVT DE PROTÓTIPO BAJA / LUCAS
DE SOUSA GURGEL Guerra. - 2018.
38 f. : il.
Orientador: ANDERSSON GUIMARÃES OLIVEIRA.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2018.
1. MOLAS HELICOIDAIS. 2. CÂMBIO CVT. 3. BAJA.
4. COMET 780. I. OLIVEIRA, ANDERSSON GUIMARÃES ,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA
CAMPUS DE CARAÚBAS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

As 11 horas do dia 17 de setembro do ano de 2018, na sala 07 do Bloco 02 da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA (Campus Caraúbas), sob a presidência do professor Me. Andersson Guimarães Oliveira, reuniu-se a Banca Examinadora de defesa de trabalho de conclusão de curso de autoria do aluno Lucas de Sousa Gurgel Guerra, aluno do curso de Engenharia Mecânica, com o título **"DETERMINAÇÃO DE RIGIDEZ TORCIONAL DE MOLA APLICADA EM CAMBIO CVT DE PROTÓTIPO BAIXA"**. A Banca Examinadora ficou assim constituída: Prof. Me. Andersson Guimarães Oliveira, presidente da banca e orientador do trabalho de conclusão de curso; Prof. Dr. Jackson de Brito Simões e Prof. Me. Carlos Cassio de Alcântara. Foram registradas as seguintes ocorrências:

sem ocorrência

Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada, tendo o aluno obtido as seguintes notas: 8,0 (oito); 7,0 (sete) e 7,0 (sete). Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi com média geral 7,3 (sete vírgula três), fazendo jus, portanto, ao título de Bacharel em Engenharia Mecânica. E para constar, eu, Andersson Guimarães Oliveira, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos. Caraúbas, 17 de setembro de 2018.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.

Prof. Me. Andersson Guimarães Oliveira

Presidente

Prof. Dr. Jackson de Brito Simões

Membro

Prof. Me. Carlos Cassio de Alcântara

Membro

*Dedico este trabalho aos meus pais, **José Gurgel Guerra Neto e Jacinta Lúcia de Sousa Gurgel**, capazes de dedicar uma vida inteira de trabalho e suor à minha formação e de minha irmã, pelo exemplo de vida e por mostrarem sempre o caminho certo a seguir.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, dono de todas as coisas e conhecedor de tudo, Dele que extraímos a sabedoria e por ele se constrói qualquer obra, por ter me dado fé, perseverança e confiança, nesta e em várias etapas da minha vida.

Agradeço aos meus pais, José Gurgel e Jacinta Lúcia, pela presença em todos os momentos, por entender cada segundo que eu precisei ficar trabalhando e produzindo, pelo incentivo e por todo o investimento que fizeram, fazem e sempre farão no meu futuro. Agradeço a minha irmã, Gabriela Cemirames, pelos incentivos, pela força, pela experiência passada e por estar comigo quando precisei.

Agradeço a minha namorada, Amanda Raquel da Costa Silva, por todos os instantes em que fraquejei e ela estava lá para me reerguer, por entender a ausência em certos momentos devido ao trabalho, por ajudar se eu não conseguia achar alguma informação, por ouvir sempre o que eu tinha a falar, por transparecer paz quando eu precisava, por cada segundo ao meu lado.

Agradeço aos meus amigos, Ruthenio, Leuton, Clementino, pela essencial ajuda na elaboração do experimento e apoio nas necessidades diversas.

Agradeço ao Professor Orientador Andersson Guimarães Oliveira, pelo precioso tempo aplicado, pela ajuda e disponibilidade.

Agradeço a banca examinadora pela inestimável auxílio, com sugestões e observações.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

Então você para, olha para si e diz: Eu não vou conseguir, está muito difícil. Então Deus para, olha e diz: Para você é impossível, mas para Mim não. Eu estou contigo, você vai conseguir. (Lucas 1:37)

RESUMO

Os projetos de desenvolvimento de veículos off-road do tipo Baja propõem uma oportunidade muito interessante e as concepções dos alunos crescem em paralelo ao nível de domínio das características de todos os subsistemas dos veículos.

Estes veículos se utilizam de câmbios CVT, que transferem continuamente a potência de motor, com relação de marchas infinitas. O modelo de CVT empregado no protótipo CT-18 do projeto Baja desenvolvido no Campus da UFERSA na cidade de Caraúbas é o Comet 780, bastante utilizado nos projetos espalhados em todo o Brasil. O presente trabalho tem como objetivo geral caracterizar a constante torcional das molas aplicadas no câmbio, de forma a aumentar o leque de oportunidades de manipulação do desempenho do veículo, beneficiando a equipe.

O estudo é baseado na aplicação dos conhecimentos de elementos de máquinas na determinação da constante torcional das molas. Com a análise física das mesmas, levantamento de suas características e parâmetros construtivos. Em seguida, foi empregado um método analítico para determinação da rigidez com base na geometria da mola cujos resultados puderam ser comparados com medição experimental.

As equações se mostram adequadas e eficazes para determinação da constante torcional. Diversas variáveis experimentais existiram e, frente a valores de erros apresentados, pôde-se notar a necessidade de mantê-los futuramente mais controlados a fim de trazer ainda mais próximo os resultados analíticos aos experimentais.

Palavras-Chave: Molas Helicoidais. Câmbio CVT. Baja. Comet 780.

ABSTRACT

Baja's off-road vehicle development projects offer a very interesting opportunity and student conceptions grow parallel to the mastery level of the characteristics of all vehicle subsystems.

These vehicles use CVT gears, which continuously transfer the engine power, with infinite gears ratio. The CVT model used in the CT-18 prototype of the Baja project developed at the UFERSA campus in the city of Caraúbas is the Comet 780, widely used in projects spread throughout Brazil. The present work has as general objective to characterize the torsional constant of the springs applied in the exchange, in order to increase the range of opportunities of manipulation of the performance of the vehicle, benefiting the team.

The study is based on the application of the knowledge of machine elements in determining the torsional constant of the springs. With the physical analysis of the same, survey of its characteristics and constructive parameters. Then, an analytical method was used to determine stiffness based on the geometry of the spring whose results could be compared with experimental measurement.

The equations are suitable and effective for determining the torsional constant. Several experimental variables existed and, faced with error values presented, it was possible to note the need to keep them in a more controlled future in order to bring the analytical results even closer to the experimental results.

Keywords: Helical Springs. CVT exchange. Low. Comet 780.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mola Plana do Tipo Viga	15
Figura 2 Molas Arruela ou de Prato	15
Figura 3 Molas de Potência	16
Figura 4 Tipos de Molas Helicoidais. a) Molas de Tração b) Molas de Compressão c) Molas de Torção.	16
Figura 5 Tipo de Extremidade das Molas.....	17
Figura 6 Caixa de Câmbio Manual.....	20
Figura 7 Esquema Câmbio CVT.	21
Figura 8 Comet 780	21
Figura 9 Metodologia.	22
Figura 10 Molas em Posição de Trabalho.	23
Figura 11 Molas Utilizadas no CVT Comet 780.....	24
Figura 12 Bases para Mecanismo de Ensaio.	26
Figura 13 Eixo Sendo Serrado.....	26
Figura 14 Eixo Sendo Usinado.....	27
Figura 15 Encosto Sendo Soldado.....	27
Figura 16 Bases após Serviço de Soldagem.	28
Figura 17 Eixo com Parafuso Soldado.	28
Figura 18 Massa de Teste - 500 g.....	29
Figura 19 Mecanismo Final - Sem Braço de Alavanca.	29
Figura 20 Mecanismo Final - Com Braço de Alavanca e Massa.	30
Figura 21 Medição Braço de Alavanca.	30
Figura 22 Posição Inicial.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros das Molas.....	24
Tabela 2 Resultados das variações angulares experimentais.....	32
Tabela 3 Comparação dos Valores.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

SAE – Society of Automotive Engineers.

AISI – American Iron and Steel Institute.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Geral	13
2.2	Específicos	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Molas	14
3.1.1	Esforços Mecânicos	14
3.1.2	Aplicações de Molas	14
3.2	Tipos de Molas	14
3.2.1	Molas Planas	14
3.2.2	Molas Arruela	15
3.2.3	Molas de Potência	15
3.2.4	Molas Helicoidais	16
3.2.5	Determinação Analítica de Rigidez Torcional	17
3.3	Aços	18
3.4	Aços para Molas	18
3.5	Câmbio CVT	19
4	METODOLOGIA	22
4.1	Obtenção dos Parâmetros Físicos e Geométricos	23
4.2	Constantes Torcionais Teóricas	25
4.2.1	Mola a	25
4.2.2	Mola b	25
4.3	Realização de Experimento	25
4.3.1	Preparação do Dispositivo para Ensaio	25
4.3.2	Execução do Experimento	28
4.4	Realização Dos Cálculos	32
5	Resultados e Discussões	34
6	CONCLUSÕES	36
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	37
8	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, a necessidade de desenvolver novas tecnologias está sempre crescendo. Seja na área da engenharia, saúde, na ciência de forma geral. As pesquisas científicas desenvolvidas no mundo todo são motores desse desenvolvimento pretendido e as universidades se mostram um ambiente extremamente importante e propício para que as mesmas aconteçam.

Os cursos de graduação de todo o mundo e também no Brasil criam meios para oferecer aos seus alunos a condição deles aplicarem na prática a teoria estudada ao longo de sua formação. Os cursos de engenharia mecânica não fazem diferente e dentro deste contexto, o curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do Semiárido UFRSA possui o projeto permanente cujo objetivo é o desenvolvimento de um veículo para desafios fora de estrada, em absolutamente todas as etapas, assim denominado programa Baja SAE Brasil. Esse programa é protagonista em grande maioria de cursos de engenharia mecânica nacionais.

O programa Baja SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de engenharia que lhes oferece a chance de aplicarem na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho.

Os alunos que participam do Baja SAE BRASIL devem formar equipes que representarão a instituição de ensino superior à qual estão ligados. Estas equipes são desafiadas anualmente a participar da competição, que reúne os estudantes e promove a avaliação comparativa dos projetos. No Brasil a competição nacional recebe o nome de Competição Baja SAE BRASIL e as competições regionais são nomeadas como Etapa Sul, Sudeste e Nordeste. As etapas da competição não são complementares e a equipe vencedora do Baja nacional ganha o direito de competir da etapa internacional da prova nos Estados Unidos.

Existem etapas diferentes na avaliação dos jurados dentro da competição e dessa forma exigem dos estudantes cada vez mais dedicação e empenhos para estarem melhorando os veículos para superarem os obstáculos diversos.

O conhecimento pleno das características e propriedades dos elementos de máquina que compõem o projeto é um fator fundamental para aumentar o grau de domínio sobre o

comportamento dinâmico do veículo, fator este que resulta em maior desempenho do protótipo e aumento de competitividade.

Durante as competições de Baja SAE, os modelos são submetidos a rigorosos testes de segurança, conforto, resistência e avaliação de relatório de projeto. Tal oportunidade propicia aos futuros engenheiros desenvolverem tecnologias de baixo custo, porém eficientes, com o intuito de aumentar o desempenho dos carros, podendo mais tarde ser empregadas.

Neste sentido, no projeto Caraubaja dos alunos do curso de Graduação em Engenharia Mecânica da UFERSA, campos Caraúbas, verificou-se que existe a necessidade de melhoria no câmbio utilizado no veículo. Dentro desta necessidade, constatou-se ser de extrema importância a caracterização e conhecimento por completo das molas empregadas no subsistema.

Frente a narrativa acima, o presente trabalho propõe-se caracterizar as molas de torção utilizadas no câmbio do protótipo. Em seguida, pretende-se confrontar os dados que serão obtidos experimentalmente e analiticamente e, diante da conclusão, finalmente disponibilizar as informações para os projetistas de forma que possam estudar e garantir a melhor aplicação para os seus objetivos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar as molas de torção, aplicadas na transmissão, tipo CVT, existente no veículo Baja SAE de modo a caracterizá-las, determinando sua rigidez.

2.2 Específicos

Montar procedimento experimental para determinação da constante de rigidez torcional;

Aplicar conhecimentos de elementos de máquinas e calcular a rigidez teórica da mola;

Comparar os resultados analíticos com os experimentais;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

As etapas da competição entre os protótipos Baja SAE estão a cada ano mais intensas, com provas bem mais elaboradas que exigem muito mais dos projetos e dos estudantes. Contudo, para que os mesmos possam manejar todas as variáveis de forma a atingir seus objetivos, é essencial o conhecimento de absolutamente todos os detalhes do veículo.

3.1 Molas

3.1.1 Esforços Mecânicos

As condições de serviço são, muitas das vezes bastante severas para as mais diversas aplicações dentro da indústria. Segundo Hibbeler (2010), a resistência do material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem ruptura. No projeto de molas, é imprescindível saber quais os esforços os quais as mesmas serão submetidas para o correto dimensionamento. Segundo Budynas (2011), os principais esforços são de compressão, tração e torção.

3.1.2 Aplicações de Molas

As aplicações de molas são diversas, variando principalmente com os esforços os quais o equipamento é submetido. São exemplos, aplicações automobilísticas como suspensão de veículos, em válvulas de motores, matrizes de fabricação de peças, fechadores de portas, contrabalanceamento de máquinas, em pedias, terminação de curso de mancais, na indústria de brinquedos, em subsistemas de transmissão de veículos, dentre outras aplicações.

3.2 Tipos de Molas

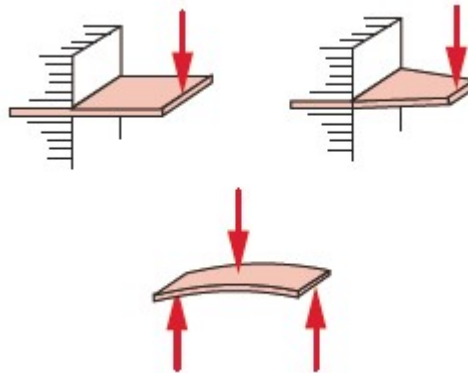
Segundo Budynas (2011) molas são corpos metálicos aplicados amplamente na engenharia que são desejados quando se objetiva, com uma geometria conhecida, obter flexibilidade com um grau que o projetista busca. Além disso esses elementos de máquinas permitem distorção temporária para e restauração imediata de uma determinada função.

Segundo Norton (2013), as molas podem ser classificadas em molas helicoidais, molas planas, molas arruela ou prato e molas de potência.

3.2.1 Molas Planas

São molas que normalmente se apresentam como em balanço ou vigas biapoiadas, como mostra a Figura 1. Esses casos, existem distribuições de tensão ao longo do corpo da viga que resistem a aplicação da força e promovem uma certa distorção.

Figura 1 Mola Plana do Tipo Viga



Fonte: Norton, 2013.

3.2.2 Molas Arruela

Essas molas são utilizadas para carregamentos axiais, devido justamente seu formato, como traz a Figura 2. Geralmente são forças de compressão elevadas que geram baixa deflexão. Aplicação comum é por exemplo a terminação de curso de um mancal.

Figura 2 Molas Arruela ou de Prato

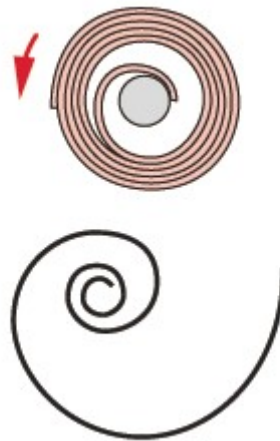


Fonte: Norton, 2013

3.2.3 Molas de Potência

Essas molas são aplicadas quando o objetivo principal do projetista é guardar energia e fornecer torção. Aplicações comuns são relógios de corda e brinquedos. A Figura 3 mostra um exemplo desse tipo.

Figura 3 Molas de Potência

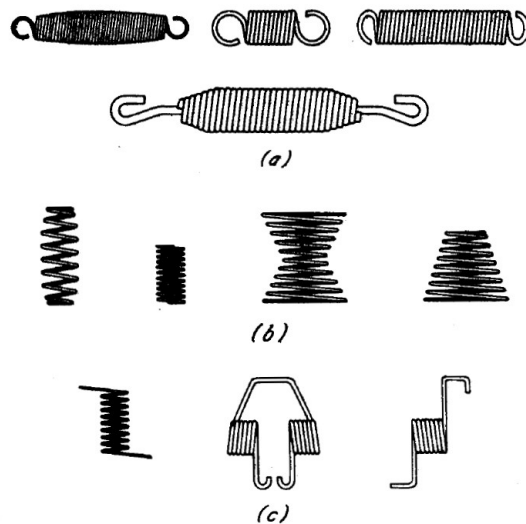


Fonte: Norton, 2013.

3.2.4 Molas Helicoidais

Existem três tipos de molas helicoidais, as molas de extensão, molas de compressão e molas de torção.

Figura 4 Tipos de Molas Helicoidais. a) Molas de Tração b) Molas de Compressão c) Molas de Torção.



Fonte: Chiaverini, 1986

As molas de extensão Figura 4a, são utilizadas comumente quando se deseja resistir a esforços de tração. Já quando os esforços envolvidos são de compressão, os projetos são feitos com as molas helicoidais de compressão Figura 4b). E no caso em que o objetivo é resistir esforços de torção, e que são objeto do estudo, aplica-se as molas helicoidais de torção Figura 4c).

Com relação às molas de torção, atualmente empregadas no protótipo, existe a necessidade de conhecer a rigidez das mesmas, uma vez que, o próprio fabricante não fornece essa informação.

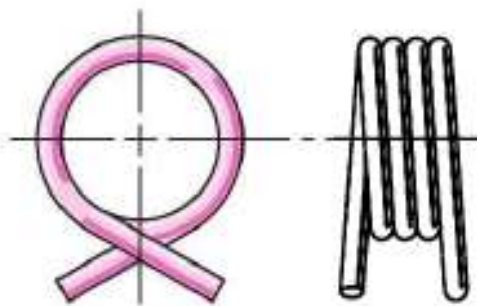
O conhecimento da rigidez das molas é fator fundamental para permitir analisar o comportamento dinâmico e estrutural do subsistema que as emprega. Variando com o objetivo e finalidade da prova, eles vão projetar de maneira ao câmbio atingir a velocidade máxima em menos tempo, se a pretensão for velocidade máxima e em contrapartida, caso eles necessitem de mais torque por mais tempo, será empregada uma mola de constante torcional superior.

3.2.5 Determinação Analítica de Rigidez Torcional

A partir do levantamento dos parâmetros construtivos e geométricos da mola, pode-se aplicar o equacionamento encontrado na literatura, objetivando-se à determinação da constante torcional.

O Budynas (2011) traz que o tipo de extremidade que a mola possui é importante do ponto de vista econômico e de projeto. A de menor custo comparativo é o tipo de torção direta, apresentado na Figura 5. Esse tipo inclusive, é o empregado nas molas em estudo. Deve-se identificar também o número de espiras ativas, os comprimentos das extremidades da mola, como também os diâmetros envolvidos, tanto externo da mola como o diâmetro do fio.

Figura 5 Tipo de Extremidade das Molas.



Fonte: Budynas, 2011

Para se determinar o número de espiras ativas, é necessário determinar o número de voltas no corpo de cada uma das molas e também a dimensão de suas pernas é aplicada a equação (1) (BUDYNAS, 2011).:

$$N_a = N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D} \quad (1)$$

O valor de N_b é o número de voltas no corpo livre da mola, obtidos por soma, podendo assumir valores não inteiros, estimados através do ângulo de posição inicial da mola.

O diâmetro médio da mola deve ser encontrado subtraindo do diâmetro externo, o diâmetro do fio, como mostra a equação 2.

$$D = D_e - D_f \quad (2)$$

A constante torcional da mola, também chamada de razão de mola, é obtida através da equação (3);

$$k = \frac{d^4 E}{10,8 D N_a} \quad (3)$$

Onde o 10,8 é uma constante que leva em consideração o efeito de fricção entre as espiras e o eixo, o E é o módulo de elasticidade do material, o D é o diâmetro médio e o N_a o número de espiras ativas.

Segundo Norton (2013) existe uma gama de materiais que podem ser aplicados em molas, contudo sua maioria são aços que, a depender da aplicação, seja esta mais ou menos severa, podem passar por algum tratamento a fim de obter a característica pretendida.

3.3 Aços

São materiais de extrema importância nos dias de hoje. O desenvolvimento da sociedade, de forma geral, tem na sua base no desenvolvimento da indústria e esta não se desenvolveria sem os aços. O aço é uma liga de ferro carbono, como outras ligas que também são formadas por esses dois elementos essenciais. Todavia, o aço é caracterizado por conter de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação (CHIAVERINI, 2012). Esses elementos residuais são por exemplo fósforo, enxofre, silício e manganês. Cada um deles influencia, positivamente ou negativamente no desempenho do aço, a depender do objetivo para o qual este é produzido.

Segundo Ribeiro et al. (2013) o mercado atual tem grandes exigências por aços diversos, peças de reposição o que faz com que as siderúrgicas tenham grande variedade nos tratamentos aplicados aos aços.

3.4 Aços para Molas

Segundo Chiaverini (1986), as aplicações diversas de molas, podem resumir os esforços as quais esses elementos serão submetidos basicamente em três: Molas de extensão,

destinadas a suportar esforços de tração; Molas de compressão, como o próprio nome já diz, destinadas a suportar esforços de compressão e choque e por último, molas de torção, projetadas a suportar esforços laterais de torção.

No processo de fabricação dos aços, é comum algumas imperfeições surgirem, imperfeições estas como marcas de ferramentas, inclusões e rugosidade superficial elevada. Contudo aços para molas devem receber tratamentos para as eximir dessas imperfeições, pois suas condições de trabalho são normalmente severas e os esforços internos de tensão e a fadiga são elevadas (CHIAVERINI, 1986)

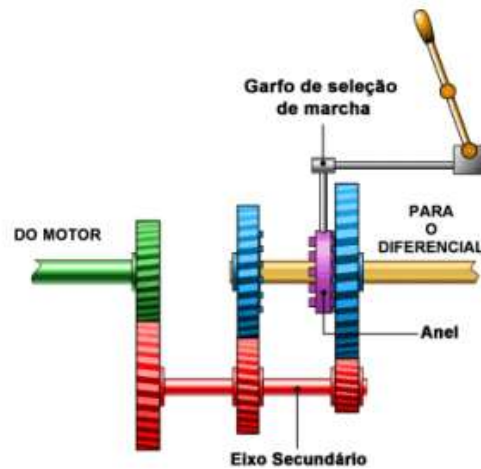
Dessa maneira, entende-se como necessidade das molas, possuírem altos valores de limites de elasticidade, elevado limite a fadiga para que durante a operação, rupturas não surjam e concentradores de tensão prejudiquem o elemento. Também são desejáveis boa resiliência, garantindo grande resistência ao choque.

Dependendo da severidade da aplicação da mola, deve selecioná-la com base na composição química, as propriedades mecânicas, qualidade superficial e custo (CHIAVERINE, 1986). Embora os aços comuns sejam os mais aplicados nas molas, se sua aplicação requerer elevadas temperaturas, ou maior rigor nas características mecânicas, serão utilizados aços ligas, com estudada adição de elementos com a finalidade de atingir a característica pretendida.

3.5 Câmbio CVT

Em termos de evolução, ao longo dos tempos a engenharia conseguiu desenvolver inúmeras tecnologias no que diz respeito a motorização de veículos, aumento de potência, torque, velocidade máxima alcançada, dentre outras possibilidades. E, em paralelo, a transmissão, o subsistema responsável por transferir às rodas toda essa potência, também seguiu a mesma linha de desenvolvimento.

Figura 6 Caixa de Câmbio Manual.



Fonte: Brain (2003)

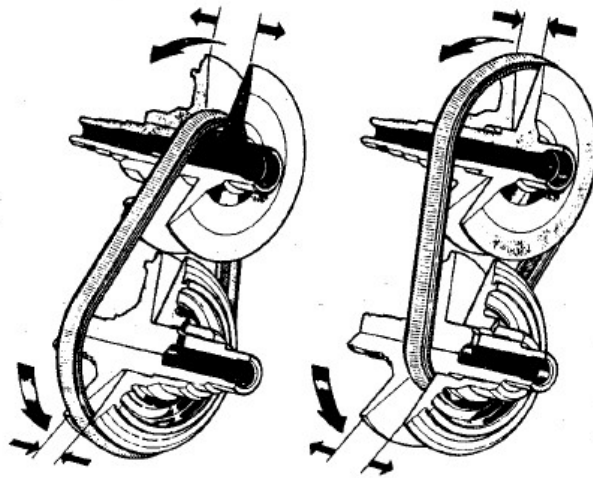
O mais comum são as caixas de transmissões manuais (Figura 6), com diferentes relações de engrenamento, onde o condutor do veículo, no desenvolver da condução, manualmente altera a marcha através de uma alavanca e alcança diferentes torques e/ou diferentes velocidades finais, normalmente variando de 4 a 6 marchas, nos automóveis convencionais.

Segundo Lechner & Naunheimer (1999), a potência de um motor de combustão interna não pode ser totalmente explorada pelo número finito de combinações possível entre os engrenamentos, isto é, número finito de marchas.

Embora esse número de marchas seja finito, entre uma marcha e outra ele pode sofrer variações infinitesimais de modo que a relação de transmissão seja variável. Dentro deste conceito, lança-se mão do câmbio CVT.

O câmbio CVT (continuously variable transmission), sigla em inglês que significa transmissão continuamente variável, proporciona à transmissão de potência uma relação infinita de marchas entre dois limites extremos, onde o motor pode ser operado no ponto de operação ideal para economia ou desempenho, conforme seja necessário. O sistema consiste principalmente de discos cônicos e uma correia. A potência é transmitida friccionalmente através do ajuste axial dos discos cônicos, a correia roda em diâmetros variáveis (Figura 7), variando infinitamente a relação (LECHNER & NAUNHEIMER, 1999).

Figura 7 Esquema Câmbio CVT.



Fonte: LECHNER & NAUNHEIMER, 1999

O modelo aplicado no protótipo baja é o do tipo de polia expansiva COMET 780 (Figura 8). É muito utilizado nesses tipos de veículos, principalmente por melhorar o torque oferecido pelo motor, apresenta um bom desempenho, adequando-se ao objetivo, simples manuseio, montagem, desmontagem e manutenção.

Figura 8 Comet 780

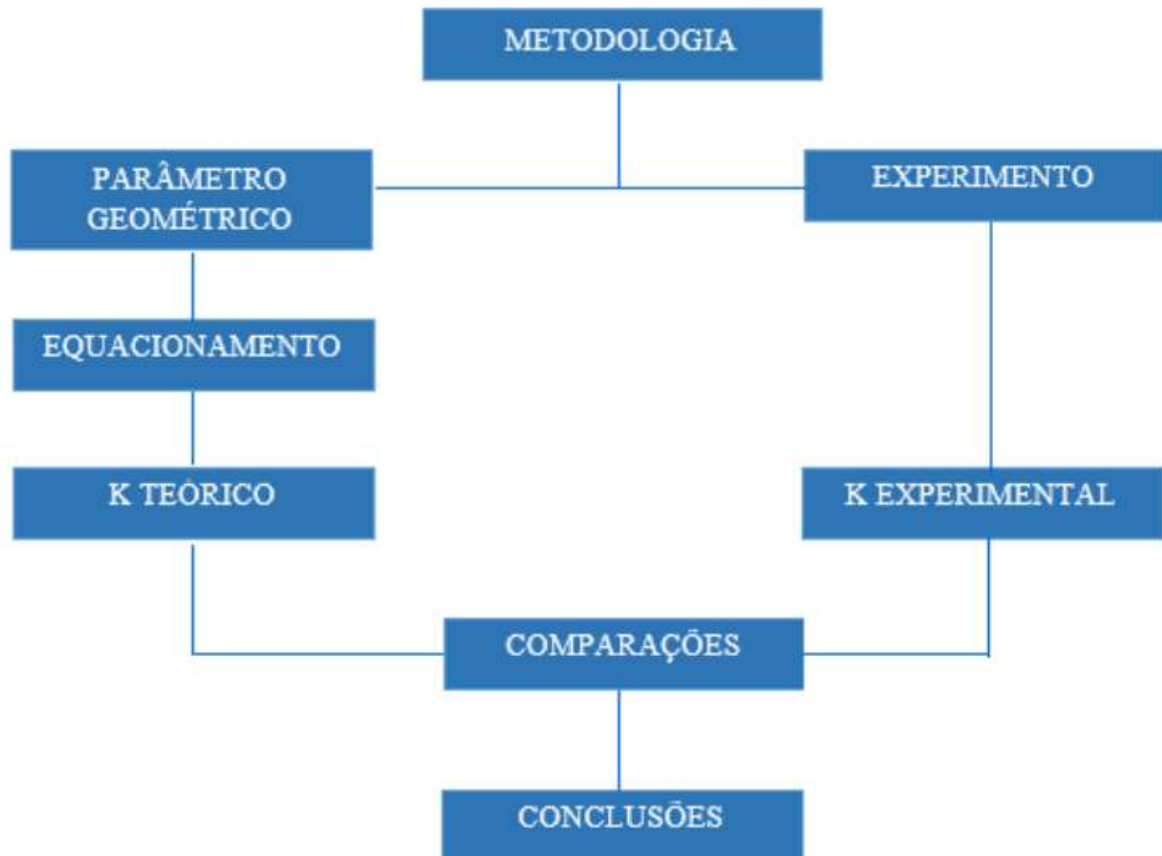


Fonte: Próprio Autor.

4 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar como a pesquisa foi desenvolvida, apresentando todos os aspectos metodológicos. A Figura 9 exibe o fluxo.

Figura 9 Metodologia.



Fonte: Próprio Autor

Primeiramente foi necessário levantar os parâmetros geométricos das molas utilizados no CVT do protótipo, através da observação in loco. As molas que são objeto deste trabalho são molas de torção. Logo após, com subsídio didático oferecido, utilização de equacionamento apropriado foram encontradas as constantes torcionais analíticas das molas aplicadas no câmbio. Em paralelo, o experimento montado em laboratório, objetivou o levantamento da constante torcional experimental e, como mostra a Figura 9, deve-se comparar os valores, avaliar e analisar o erro encontrado e entender os principais fatores envolvidos.

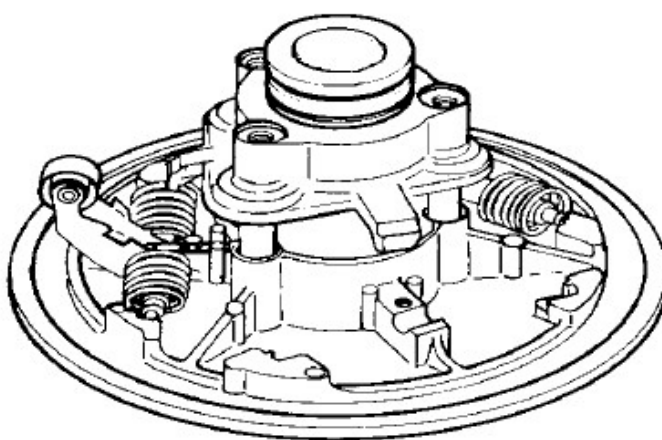
O projeto Caraubaja atualmente possui apenas um conjunto de molas em seu CVT. Durante todo o período de elaboração desta pesquisa, o pedido de compra realizado de novas

molasses não foi recebido e dessa forma nenhuma mola pôde ser retirada para uma análise mais profunda de qual material a mesma é feita, dessa forma o módulo de elasticidade utilizado na determinação teórica deverá ser estimado.

4.1 Obtenção dos Parâmetros Físicos e Geométricos

A Figura 10 é um esquema do CVT Comet 780 aberto, sem o seu “prato superior” e nele pode-se perceber, de forma destacada, o modo com o qual as molasses são montadas em sua posição de atuação.

Figura 10 Molasses em Posição de Trabalho.



Fonte: Manual Comet Industries.

Com o CVT desmontado (Figura 8), com o auxílio de um paquímetro e de uma régua, foi possível realizar a medição do diâmetro externo da mola, diâmetro do fio e, visualmente, é possível apontar quantas são as espiras em cada uma delas. Além disso nos cálculos foi considerado o módulo de elasticidade do aço para molasses. Conforme apontado pelo Norton (2013) esse valor é 207 GPa.

O Comet 780 utiliza 3 pares de molasses. A Figura 11 traz a imagem de um dos pares mola utilizado do CVT em estudo. É possível visualizar em tamanho real esses dispositivos. Sendo a mola a, a de diâmetro de fio maior, à esquerda da imagem e a mola b, situada à direita da imagem, àquela que possui diâmetro de fio menor.

O número de espiras do corpo, foi observado e, a angulação que existe ao final do corpo da mola, estimou-se um quarto de volta, somando dessa maneira 0,25 de volta a cada um dos números inteiros identificados.

As dimensões das pernas foram obtidas experimentalmente, utilizando uma régua.

Figura 11 Molas Utilizadas no CVT Comet 780.



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 1 faz um resumo dos principais valores obtidos e serve de subsídio para os cálculos efetivados em seguida.

Tabela 1 – Parâmetros das Molas. Fonte: Próprio Autor.

Parâmetro	Mola a	Mola b
L1	20 mm	20 mm
L2	10 mm	11 mm
E	207 Gpa (Teórico)	207 Gpa (Teórico)
Diâmetro do Fio	2,7 mm	1,8 mm
Diâmetro Externo da Mola	17,4 mm	16,2 mm
Nº de Voltas no Corpo (Nb)	9,25	12,25
Nº Espiras Ativas	9,47	12,45
Diâmetro Médio	14,7 mm	14,4 mm

Aplicando a equação 1, temos o número de espiras ativas da mola a. Todas as equações retiradas do Budynas (2011):

$$N_a = N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D}$$

$$N_a = 9,25 + \frac{20+10}{3\pi(14,7)}$$

$$N_a = 9,25 + 0,22 \rightarrow N_a = 9,47 \text{ Voltas}$$

Igualmente para a segunda mola, temos:

$$N_a = N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D}$$

$$N_a = 12,25 + \frac{20+11}{3\pi(16,2)}$$

$$N_a = 12,25 + 0,20 \rightarrow N_a = 12,45 \text{ Voltas}$$

4.2 Constantes Torcionais Teóricas

Com os valores de número de espiras ativas encontrados, é possível utilizar a equação de número 3 e encontrar os valores analíticos das constantes torcionais ou razões de mola.

4.2.1 Mola a

$$k_a = \frac{2,7^4(207000)}{10,8(14,7)9,47} \rightarrow k_a = 7,32 \frac{N.m}{rad}$$

4.2.2 Mola b

$$k_a = \frac{1,8^4(207000)}{10,8(14,4)12,45} \rightarrow k_a = 1,13 \frac{N.m}{rad}$$

4.3 Realização de Experimento

Como as molas helicoidais torcionais são submetidas a torques, no momento de sua deformação elas apresentam uma variação angular, que pode ser medida e com base no torque aplicado, é possível estimar a constante:

$$T = k_t \theta \quad (4)$$

O experimento consistiu basicamente em aplicar na mola um torque conhecido, onde foi gerado uma variação angular que pode ser observada e mensurada e, após essa fase, aplicaram-se os valores na equação 3, onde a constante pôde ser estimada.

4.3.1 Preparação do Dispositivo para Ensaio

Foi criado um mecanismo capaz de estimar as constantes de forma experimental. A ideia consistiu em duas bases (Figura 12), furadas no centro, onde suportes foram soldados para servirem de batentes e, dessa maneira foi aplicado o torque e medido a variação de ângulo.

Figura 12 Bases para Mecanismo de Ensaio.



Fonte: Próprio Autor.

Após esse estágio, foi serrado (Figura 13) e usinado (Figura 14) um pequeno eixo, capaz de ligar as duas bases e simular o eixo que naturalmente existe na posição de atuação das molas.

Todos os elementos envolvidos no experimento são de metal, de forma a garantir que no momento que determinado esforço seja aplicado, não haja deformações que possam prejudicar significativamente o resultado experimental.

Figura 13 Eixo Sendo Serrado.



Fonte: Próprio Autor.

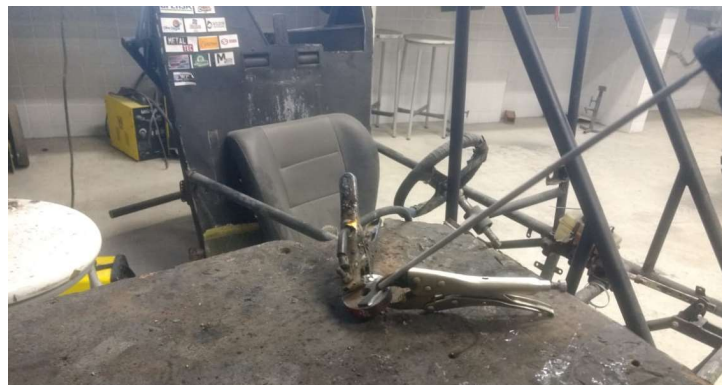
Figura 14 Eixo Sendo Usinado.



Fonte: Próprio Autor.

Em paralelo à confecção do eixo, foram soldados os suportes que vão oferecer às extremidades das molas, apoio necessário para receberem a força e assemelhar assim a posição de trabalho das mesmas. Com o auxílio de um alicate de pressão, os suportes foram presos às bases e a solda foi realizada, conforme Figura 15.

Figura 15 Encosto Sendo Soldado.



Fonte: Próprio Autor

Cada mola, precisou de dois suportes, em sentidos diferentes, por isso as bases após o processo de soldagem (Figura 16), possuem 4 encostos.

Figura 16 Bases após Serviço de Soldagem.



Fonte: Próprio Autor.

Ao deixo foi soldado um parafuso (Figura 17), para aplicação do torque.

Figura 17 Eixo com Parafuso Soldado.



Fonte: Próprio Autor.

4.3.2 Execução do Experimento

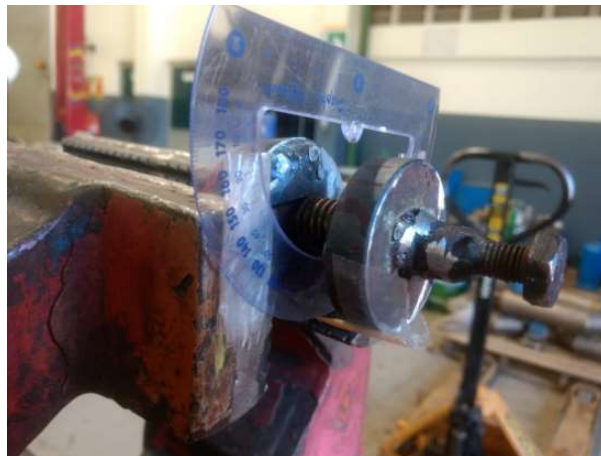
Com as bases e o eixo confeccionados, o próprio passo foi a execução em si do experimento. Inicialmente foi presa a base de baixo em uma morsa. Nas laterais, utilizando uma fita dupla face, foi preso o transferidor, permitindo a leitura do ângulo inicial e final. A mola foi posicionada, a base superior colocada no seu lugar e, como braço de alavanca para aplicação do torque, foi utilizado um alicate de pressão, que segura a cabeça do parafuso. O mecanismo final (Figura 19) permite colocar na extremidade uma massa conhecida (Figura 18) e, com a aceleração da gravidade calcular a força.

Figura 18 Massa de Teste - 500 g.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 19 Mecanismo Final - Sem Braço de Alavanca.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 20 Mecanismo Final - Com Braço de Alavanca e Massa.



Fonte: Próprio Autor.

O braço de alavanca é o próprio alicate de pressão, logo para o cálculo do torque aplicado, o comprimento da alavanca deve ser medido. Para isso, foi utilizada uma trena calibrada, conforme Figura 21. O valor encontrado foi de 205 mm.

O ângulo mostrado na Figura 20 é, por semelhança de triângulo, o mesmo ângulo lido no transferidor que está acoplado à morsa.

Figura 21 Medição Braço de Alavanca.



Fonte: Autor Próprio.

Montado o mecanismo, foi feito para cada mola, 5 ensaios a fim de obter uma média do ângulo deslocamento. Foi montado de forma que o ângulo inicial fosse 180, ou seja, paralelo à base do transferidor, de modo que a leitura inicial em graus marcado no transferidor fosse 90° graus, como mostrado na Figura 22.

Figura 22 Posição Inicial.



Fonte: Próprio Autor.

As equações necessárias para realização dos cálculos são as mostradas abaixo.

$$f = mg \cos \theta \quad (5)$$

$$T = f \cdot d \quad (6)$$

$$T = k_t \cdot \theta \quad (7)$$

O valor de f é referente à força peso, obtida pela equação 5, é aquela exercida por uma massa, quando está submetida a um campo gravitacional. O cosseno do ângulo aparece na equação pois é necessário encontrar qual componente da força está perpendicular ao braço de alavanca, por isso a aplicação da função cosseno.

Além do torque da massa, é necessário adicionar também o gerado pelo próprio peso do alicate. Este foi pesado em uma balança e sua massa foi aproximadamente igual a 500 g. Para determinação do seu centro de massa, foi dado um nó e este foi sendo deslizado ao longo do comprimento do alicate em busca de uma posição onde existisse equilíbrio estático e foi conseguido no centro do objeto. Logo, foi possível afirmar que o centro de massa está a 102,5 mm do ponto de aplicação da força.

O torque que está sendo exercido no parafuso e, consequentemente na mola que está sendo ensaiada é determinado pela equação 6. A força perpendicular multiplicada pelo braço de alavanca. Com o resultado dessa equação, utiliza-se a equação 7, onde o k_t , pode ser determinado pela divisão do torque pela variação angular.

Segue abaixo na Tabela 2, os resultados experimentais obtidos, os valores das leituras individuais e a média, que será utilizada nos cálculos da constante torcional.

Tabela 2 – Resultados das variações angulares experimentais. Fonte: Próprio Autor.

Massa de Teste - 500 g		
$\Delta\theta$, em graus		
Leitura	Mola a	Mola b
1°	16	25
2°	17	26
3°	15	26
4°	16	27
5°	16	26
Média	16	26

4.4 Realização Dos Cálculos

Aplicando a equação 5, para a mola a, tem-se:

$$f = mg \cos \theta$$

$$f = 0,5 \cdot (9,81) \cdot \cos 16$$

$$f = 4,72 \text{ N}$$

Essa é a força perpendicular ao braço de alavanca, logo é responsável por gerar o torque. Aplicando a equação 6, tem-se:

$$T = f \cdot d$$

$$T = 4,72 \cdot 0,205$$

$$T = 0,97 \text{ N.m}$$

Somado a esse torque, temos o gerado pelo próprio peso do alicate de pressão, aplicando a equação 6 novamente:

$$T = 0,5 \cdot (9,81) \cdot \cos(16) \cdot 0,1025$$

$$T = 0,48 \text{ N.m}$$

Esses valores de torques encontrados devem ser somados e aplicados na equação 7 para se determinar o valor experimental da constante, utilizando o ângulo em radianos:

$$T = k_{ta} \cdot \theta$$

$$k_{ta} = \frac{T}{\theta}$$

$$k_{ta} = \frac{1,45}{0,28}$$

$$k_{ta} = 5,18 \frac{\text{N.m}}{\text{rad}}$$

Já para a mola b, podemos repetir o mesmo procedimento, mudando os valores encontrados. Aplicando a equação 5, tem-se:

$$f = mg \cos \theta$$

$$f = 0,5 \cdot (9,81) \cdot \cos 26$$

$$f = 4,41 \text{ N}$$

Encontrando o torque, aplica-se a equação 6:

$$T = f \cdot d$$

$$T = 4,41 \cdot 0,205$$

$$T = 0,91 \text{ N.m}$$

Somado a esse torque, temos o gerado pelo próprio peso do alicate de pressão, aplicando a equação 6 novamente:

$$T = 0,5 \cdot (9,81) \cdot \cos(26) \cdot 0,1025$$

$$T = 0,45 \text{ N.m}$$

Esses valores de torques encontrados devem ser somados e aplicados na equação 7 para se determinar o valor experimental da constante da mola b, utilizando o ângulo em radianos:

$$T = k_{tb} \cdot \theta$$

$$k_{ta} = \frac{T}{\theta}$$

$$k_{ta} = \frac{1,36}{0,45}$$

$$k_{ta} = 3 \frac{\text{N.m}}{\text{rad}}$$

5 Resultados e Discussões

Inicialmente é importante fazer uma comparação entre os valores encontrados analiticamente e os valores encontrados experimentalmente. Valores na tabela 3. O erro foi calculado, com a equação 7.

$$Erro = \frac{|Teórico - Experimental|}{Experimental} \times 100$$

Tabela 3 – Comparação dos Valores. Fonte: Próprio Autor.

ola	M N.m/rad	Analítico N.m/rad	Experimental N.m/rad	Erro %
A		7,32	5,18	41,3
B		1,13	3	62,3

Como pode ser observado, o erro variou de uma mola para a outra, e essa discrepância pode ser atribuída ao próprio experimento, pois com a mola a o erro foi menor e na mola b se mostrou muito mais elevado. A aplicação do equacionamento se mostra eficaz na determinação da rigidez, contudo para que o resultado experimental chegue mais próximo do analítico, as variáveis discutidas a seguir precisam ser mais bem controladas.

Na prática, poderia ser necessário a utilização de uma massa maior e outras menores, ou seja, deve ser repetido para alcance de outras deflexões, consequentemente outros ângulos e dessa maneira, repetir os cálculos para melhor observação.

A pré-carga dada no experimento foi apenas a do próprio peso do alicate de pressão, que poderia ser calculada definindo-se o centro de massa e encontrando a distância do mesmo até o ponto de aplicação da força. Essa pré-carga pode ter sido muito diferente da que é dada no momento da montagem do CVT. Seus próprios aspectos construtivos garantem uma pré-carga, devido à posição inicial da mola, Esse pode ter sido mais um fator a contribuir para o aumento do erro experimental. O cálculo pode ser repetido, desconsiderando o próprio peso do alicate, considerando-o como uma viga delgada.

Erros que se acumulam, inerentes à própria realização do cálculo, carregados ao longo da aplicação de equações, fatores como arredondamentos de valores, aceleração da gravidade, erros de paralaxe no momento da leitura do ângulo, gerados pela má distribuição da luz, e também pela angulação que o olho do executante que realiza a leitura está do transferidor, que

pode alterar o valor do ângulo, conseqüentemente da força perpendicular ao braço de alavanca.

O atrito, além de folgas existentes no experimento trazem prejuízos ao mesmo e causando uma elevação do erro experimental. Folgas entre o eixo e as bases, atrito entre o eixo confeccionado e as bases, atrito entre as extremidades da mola e os encostos, no próprio corpo da mola, incrustações de sujeira, ou seja, resistência diversas que existiam nos corpos do mecanismo, que podem ter prejudicado o resultado final.

Outro ponto a ser discutido, além da execução prática, é o cálculo teórico. Através da estimativa da constante do material, ou seja, foi utilizada uma referência didática, de forma generalista. Com uma análise de qual material exato a mola é fabricada e se a mesma possui algum tipo de tratamento, seja este superficial ou térmico, é possível gerar melhores assertivas com relação à constante de elasticidade e gerar um valor analítico mais fiel.

Com os valores das constantes, equipes que se utilizam dos câmbios tipo Comet 780 nos seus veículos podem abrir um leque de oportunidades, não ficando reféns das molas que já são instaladas de fábrica nos modelos e moldarem molas, de mesma dimensão, contudo de constantes diferentes, para que o CVT possa abrir ou fechar de maneira mais rápida ou lenta, a depender do objetivo. Se baseando sempre com relação aos valores de constantes originais estimados no presente trabalho.

Contudo, frente aos valores dos erros, os valores experimentais não podem servir como embasamento para a equipe. Os resultados foram discrepantes e não fornecem segurança para as aplicações aos quais são devidas.

Embora essa maneira de executar não tenha sido adequada, colocando em cheque a veracidade necessária dos resultados, o ponto de partida para o objetivo da equipe devem ser os valores teóricos, para uma futura análise mais detalhada das molas e a repetição do experimento noutros moldes, a fim de que os valores teóricos e experimentais fiquem mais próximos

6 CONCLUSÕES

Diante de toda o desenrolar do trabalho é possível verificar que as molas que equipam o câmbio CVT do protótipo baja são de uma importância vital para tanto o funcionamento do subsistema como para o seu bom desempenho.

O delineamento experimental criado e traçado não se mostrou interessante para determinação da constante, pois os valores de erro foram muito elevados, não sendo alcançada a veracidade devida.

Foi possível chegar a valores analíticos e experimentais, trazendo à equipe do Caraubaja, com os valores teóricos, um ponto de partida e, com o experimento desenvolvido neste trabalho, a ideia um dispositivo que assemelha a posição de trabalho das molas, que deve ser melhorado e refeito, abrindo um novo leque de possibilidades para alterarem o conjunto de molas do subsistema e alcançarem novos desempenhos com o veículo.

Dificuldades de operacionalizar a ideia prática do trabalho podem ser futuramente melhoradas e replicadas, de modo a potencializar a veracidade dos resultados e garantir conhecimento bastante superior com relação ao subsistema.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos que podem ser realizados em continuidade a este seria, quando a equipe adquirisse novos pares de molas, iguais às testadas um estudo detalhado com a realização de metalografia, ensaios de dureza dentre outros, com o objetivo de afirmarmos com certeza qual o material que as molas são feitas.

O experimento pode ser repetido com uma quantidade maior de massas, de, por exemplo 200 g, 400 g, 600 g, 800 g e 1 kg, de forma a observar o comportamento da mola nas diversas massas e observar se em determinada faixa os valores da constante passam a ser mais fixos, entendendo que a pré-carga foi adequada.

É possível também usar o mesmo mecanismo, contudo controlar melhor as variáveis como atrito e folga, utilizar um torquímetro de relógio, com resolução baixa, em torno de 0,1 n.m, para que a mínima variação de ângulo seja lida e de forma instantânea também o ângulo seja lido, possivelmente plotando futuramente um gráfico estimando com maior clareza a tensão x deformação angular da mola e consequentemente sua constante.

8 REFERÊNCIAS

Chiaverini, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. Ampl e Rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.

Chiaverini, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Will, 1986.

Budynas, Richard G; Nisbett, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**: Projeto de Engenharia Mecânica. 8 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.

Norton, Robert L. **Projeto de Máquinas**: Uma abordagem Integrada. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXIII. **Estudo dos fatores influentes nas múltiplas respostas mecânicas em arames SAE 9254**. Salvador, 2013. Disponível em:

<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_177_007_22284.pdf>

Acesso: 03/08/2018.

Lechner, Gisbert; Naunheimer, Harald. **Automotive Transmissions**: Fundamentals, Selection, Design and Application. New York, 1999.

Hibbeler, Russel Charles. **Resistência dos Materiais**. 7 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

BRAIN, M. **COMO FUNCIONAM AS TRANSMISSÕES MANUAIS**. In: how stuff works: como tudo funciona. Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/transmissoes-manuais.htm> Acesso em: 20 set 2018.