

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

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE COIFA, GRAXA E
REVESTIMENTO GLIDECOTE NA ANÁLISE MODAL DE UM EIXO DE
TRANSMISSÃO

por

Tarik Aziz Saded Din de Souza

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, setembro de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Souza, Tarik Aziz Saded Din
ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE COIFA, GRAXA
E REVESTIMENTO GLIDECOTE NA ANÁLISE MODAL DE UM EIXO
DE TRANSMISSÃO / Tarik Aziz Saded Din Souza. -- 2022.
30 f.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Milbrath 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, 2022.

1. Análise modal. 2. Eixo de transmissão. 3.
Amortecimento estrutural. I. Leon, Prof. Dr. Daniel
Milbrath, orient. II. Título.

Tarik Aziz Saded Din de Souza

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE COIFA, GRAXA E
REVESTIMENTO GLIDECOTE NA ANÁLISE MODAL DE UM EIXO DE
TRANSMISSÃO

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. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, setembro de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Fátima e João Batista, por serem exemplos de caráter, valores e trabalho, aos meus irmãos Samir, Nágila, Jamila, Zahra, Tayssir e Karima, e à minha doce e querida companheira Maíra Bernardt Bonini, pela compreensão e apoio durante todos esses anos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio e incentivo estudantil desde o ensino fundamental até este momento de graduação. Aos meus avós maternos e paternos, pelo o exemplo de caráter e união, presentes nas histórias familiares, que hoje não estão mais entre nós.

À minha companheira Maíra Bernardt Bonini, pelo o apoio incondicional, compartilhando os momentos difíceis nesta jornada e às minhas bichanas Sol e Vênus pelo companheirismo nas horas de estudo.

Agradeço aos amigos e companheiros que fiz durante o curso de Engenharia Mecânica, em especial, ao meu grande amigo Diego Bueno Borges.

Aos amigos e colegas de bolsa do LAMEF, no qual tive muito aprendizado e pude me desenvolver como engenheiro mecânico.

Aos colegas de trabalho e amigos da Dana, em especial a Jailson Madalena, Carlos Bohrer, Fernando da Silva, Klismann Salles e Vinicius Medina, estes que me suportaram diversas vezes em ensinamento e nos momentos de dúvidas.

Ao meu orientador Daniel Milbrath de Leon, que aceitou trabalhar no assunto proposto, mostrando-se sempre disposto em ajudar e me norteou em diversos momentos de dificuldade.

Agradeço ao corpo docente da Escola de Engenharia e aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica, por todos os ensinamentos e conselhos para trilhar a vida profissional.

Finalmente, agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela disponibilização de um ensino de qualidade, da moradia estudantil (CEU) e todo suporte aos alunos PRAE, estes que foram de extrema importância para obtenção do título de engenheiro.

Veja o mundo ao seu redor com olhos brilhantes, porque os maiores segredos estão escondidos nos lugares mais improváveis. E aqueles que não acreditam em magia nunca irão encontrá-la.

Roald Dahl

Souza, Tarik Aziz Saded Din. **Análise experimental da influência de coifa, graxa e revestimento glidecote na análise modal de um eixo de transmissão**. 2022. 30 f.. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Este trabalho consiste em avaliar a influência da variação e da retirada de diferentes elementos (coifa, graxas em diferentes viscosidades e consistências e revestimento glidecote) utilizados na montagem de um eixo de transmissão, na análise modal experimental. Além disso, visa correlacionar com o resultado obtido na análise modal numérica. O experimento é baseado na determinação da frequência natural do componente em condições de montagem similares às do veículo. A frequência natural é determinada com o equipamento LMS SCADAS XS, usado em conjunto com um martelo para excitação forçada e um acelerômetro para aquisição da excitação. Os resultados obtidos para as graxas em diferentes viscosidades e consistências apresentaram variações irrelevantes quando comparadas com a graxa referência. Os resultados obtidos com a retirada gradativa dos elementos de montagem (coifa, graxa e glidecote) apresentaram uma variação significativa, chegando a um decréscimo de 35,85% na frequência natural para o caso de retirada de todos esses elementos, quando comparado ao conjunto original. A comparação entre a frequência natural encontrada na análise experimental e numérica para o eixo de transmissão foi de 3,98%. Esse estudo é importante para avaliação dos riscos associados à perda destes elementos durante o uso no veículo.

PALAVRAS-CHAVE: Análise modal, Eixo de transmissão, Amortecimento estrutural.

Souza, Tarik Aziz Saded Din. **Experimental analysis of the influence of boot, grease and glidecote coating on the modal analysis of a driveshaft**. 2022. 30 p.. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

This work consists of evaluating the influence of variation and removal of different elements (boot, greases in different viscosities and consistencies and glidecote coating) used in the assembly of a driveshaft, in the experimental modal analysis. Furthermore, it aims to correlate with the result obtained in the numerical modal analysis. The experiment is based on the determination of the component's natural frequency under mounting conditions similar to those of the vehicle. The natural frequency is determined with the LMS SCADAS XS equipment, used in conjunction with a hammer for forced excitation and an accelerometer for excitation acquisition. The results obtained for the greases in different viscosities and consistencies showed irrelevant variations when compared to the reference grease. The results obtained with the gradual removal of the assembly elements (boot, grease and glidecote) showed a significant variation, reaching a decrease of 35.85% in the natural frequency for the case of removal of all these elements, when compared to the original set. The comparison between the natural frequency found in the experimental and numerical analysis for the driveshaft was 3.98%. This study is important to assess the risks associated with the loss of these elements during use in the vehicle.

KEYWORDS: Modal analysis, Driveshaft, Structural Damping.

NOMENCLATURA

Símbolos

c	Constante de amortecimento viscoso	N.s/m
c_c	Constante de amortecimento viscoso crítico	N.s/m
k	Constante elástica	N/m
m	Massa	kg
ζ	Fator de amortecimento	Adimensional
ω_n	Frequência natural	Hz
ω_d	Frequência de vibração amortecida	Hz

Abreviaturas e acrônimos

ASTM	American Society for Testing and Materials
EP	Extrema Pressão (<i>Extreme Pressure</i>)
FRF	Função de Resposta em Frequência
NLGI	National Lubricating Grease Institute
SAE	Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	1
2.1.	Objetivo geral	1
2.2.	Objetivos específicos	1
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	2
3.1.	Eixo de transmissão (Cardan)	2
3.2.	Vibrações mecânicas.....	3
3.2.1.	Método dos elementos finitos.....	4
3.3.	Sensores	4
3.4.	Graxas	5
3.5.	Revestimento glidecote.....	6
3.6.	Coifa sanfonada polimérica	6
3.7.	Instrumentação.....	7
3.8.	Limpeza do componente	9
3.9.	Aquisição de dados	9
3.10.	Simulação numérica.....	10
4.	RESULTADOS	11
4.1.	Análise modal – Variações estruturais de montagem.....	11
4.2.	Análise modal – Variação de lubrificantes	13
5.	CONCLUSÃO.....	14
6.	REFERÊNCIAS	15
7.	APÊNDICES	16
8.	ANEXOS	19

1. INTRODUÇÃO

O interesse pelo estudo do comportamento de estruturas em estado de vibração existe há muito tempo. Ainda no Século XVI (1590), quando Galileu Galilei apresentou suas significativas contribuições para o estudo de vibrações com pêndulos e vibração de cordas, percebeu-se a necessidade desses estudos. No Século XX, Timoshenko (1937) afirmou que com o aumento de maquinários, tanto em velocidade quanto em tamanho, a análise de vibração se tornou cada vez mais importante no desenvolvimento dos mesmos. Sabe-se ainda que o estudo de vibrações tem grande significância prática, por influenciar em estruturas como balanceamento de máquinas, vibração torcional em eixos, pás de turbinas, pontes sob carregamentos flutuantes, entre outros. Com o conhecimento dos fundamentos de vibração é possível otimizar esses produtos, minimizando ou eliminando possíveis problemas.

De acordo com He e Fu (2001), na engenharia, o processo de otimização tem uma grande relevância no desenvolvimento de novos produtos. O *design* de estruturas mecânicas objetiva gerar, cada vez mais, produtos resistentes e com menor uso de materiais, de forma que atendam as normas de segurança e confiabilidade determinadas por regulamentos governamentais, normas internas de empresas ou ainda normas estabelecidas pelo cliente (HE; FU, 2001).

Uma das formas de realizar desenvolvimento e otimização de produtos, é com o uso do Método dos Elementos Finitos para avaliar as solicitações em estruturas. Para realizar a análise, muitas vezes é necessário fazer simplificações em geometrias e montagens devido às suas complexidades. Essas simplificações são feitas em razão da não linearidade associadas a estas complexidades como contatos, grandes deslocamentos e material.

Na indústria automobilística, o eixo de transmissão (Cardan) é um dos componentes mecânicos que apresenta vibrações e ruídos quando está em operação. Estes fenômenos são ocasionados pela rotação do componente, visto que a frequência natural do eixo é um fator associado à rotação. Um eixo cardan tem vida útil longa, porém, alguns fatores, como por exemplo a lubrificação, afetam e diminuem seu tempo de trabalho, pois o tipo de lubrificação e o modo de aplicação correspondem a 90% da durabilidade do componente (DANA, 2021).

A lubrificação em componentes com altas exigências (carga e temperatura), como o eixo cardan, é muito importante para garantir a resistência às solicitações. Desta forma, a graxa utilizada neste componente é composta por aditivos de extrema pressão (EP - Extreme Pressure). Estas graxas contam com piezoviscosidade, no qual a viscosidade aumenta sob o efeito da pressão no fluido (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2000).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo experimental da influência de diferentes parâmetros na análise modal de um eixo de transmissão, como graxas em diferentes viscosidades cinemáticas e consistências NLGI (*National Lubricating Grease Institute*), revestimento de poliamida utilizado na ponta de eixo e coifa sanfonada polimérica de proteção.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente a resposta de frequência natural de um eixo de transmissão quando elementos de montagem originais são alterados e/ou removidos.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar a análise modal experimental do eixo de transmissão para determinar a frequência natural do componente para comparar com a análise numérica.

- Avaliar a resposta em frequência na retirada gradativa dos elementos suplementares de montagem do eixo de transmissão.
- Avaliar os efeitos das simplificações feitas no modelo 3D do eixo para realizar a análise modal numérica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Eixo de transmissão (Cardan)

O eixo cardan surgiu através da necessidade de movimentar as rodas traseiras dos veículos por meio da força gerada pelo motor (DANA, 2022). De forma experimental, o eixo cardan foi desenvolvido pelo italiano Geronimo Cardano, do qual deu origem ao nome eixo cardan. Sua função é transmitir a energia gerada pelo motor, neste caso o torque, para o eixo diferencial do veículo, que por sua vez, irá transferir o torque para as rodas traseiras.

Na Figura 1, é possível verificar a estrutura de um veículo 4x4 completo, e seu o eixo cardan que é o componente testado neste trabalho.

Figura 1 - Estrutura de um veículo 4x4: (a) Chassi do veículo; (b) Eixo cardan do veículo.

Fonte: O Autor.



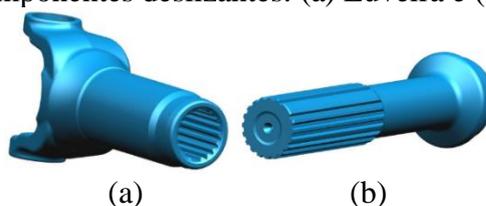
O eixo de transmissão em questão constitui-se majoritariamente de aço, tendo uma massa total de 6,85 kg. A composição dos componentes constituintes são descritos na Tabela 1, bem como suas funcionalidades.

Tabela 1 - Componentes do eixo cardan em análise. Fonte: DANA, 2022.

Componente	Quantidade	Funcionalidade
Flanges	2 Unidades	Fixar o componente no veículo
Cruzetas	2 Unidades	Permite transmitir torque em ângulo
Luveira	1 Unidade	Permite movimentos axiais sem interrupções de torque
Ponteira fixa	1 Unidade	
Coifa sanfonada	1 Unidade	Proteção contra sujidades nas regiões deslizantes
Graxa	7-9 g	Diminuir o atrito entre as regiões deslizantes

A graxa padrão utilizada nas regiões deslizantes, luveira e ponteira (Figura 2), do eixo cardan é a Chevron Ultra Duty EP, que é uma graxa destinada para solicitações extremas de altas cargas e temperaturas (DANA, 2021).

Figura 2 - Modelos dos componentes deslizantes: (a) Luveira e (b) Ponteira. Fonte: O Autor.



3.2. Vibrações mecânicas

O estudo de vibrações é feito por meio de modelamento de sistemas e equações matemáticas, com o intuito de prever o seu comportamento. Para caracterizar um modelo físico, utiliza-se três variáveis básicas como massa, rigidez e amortecimento (RAO, 2018).

A frequência natural (ω_n) de um elemento pode ser determinada através dos parâmetros de massa e rigidez, como mostra a Equação 1 para um sistema não-amortecido.

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} \quad (1)$$

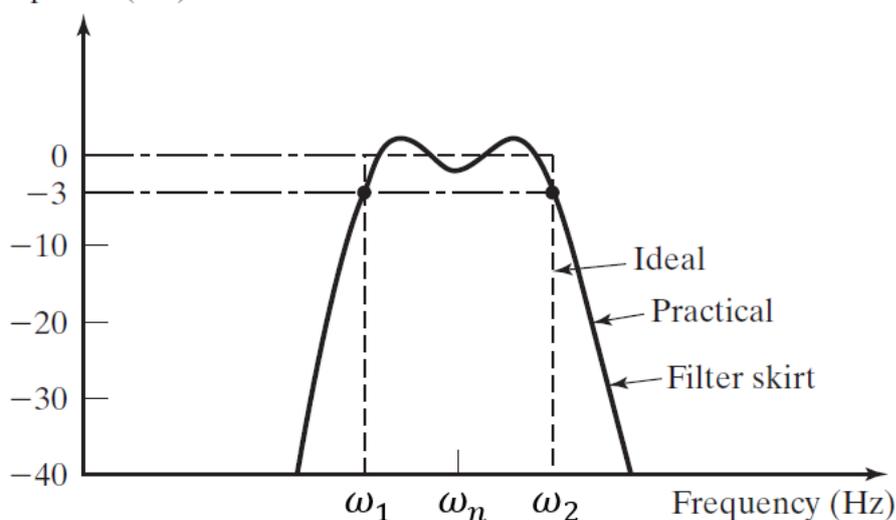
Onde k é a rigidez e m é a massa do sistema.

A partir da frequência natural e a massa do sistema é possível determinar a constante de amortecimento crítico associado a este sistema, como mostra a Equação 2.

$$c_c = 2m\omega_n \quad (2)$$

Segundo Rao (2018), o amortecimento em uma FRF (Função de Resposta em Frequência) é proporcional à largura do pico ressonante sobre a frequência central do pico. Uma forma de determinar a razão de amortecimento de uma resposta em frequência é utilizando o Método da meia Potência, também conhecido como Método 3 dB. Deslocando a resposta para três dB abaixo do nível máximo, pode-se determinar os pontos de meia-potência, como mostrado na Figura 3 (RAO, 2018).

Figura 3 - Diagrama método 3dB. Fonte: Adaptado de RAO, 2018.



A frequência natural do sistema corresponde ao pico de resposta (dB) e os pontos de meia-potência são caracterizados pelas frequências ω_1 e ω_2 (RAO, 2018).

O método 3 dB é utilizado por equipamentos de aquisição de dados para cálculo de amortecimento de uma FRF de uma análise experimental (SIEMENS, 2020). Com isso, a razão de amortecimento pode ser determinada pela Equação 3.

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (3)$$

A partir da razão de amortecimento (ζ) e a frequência natural (ω_n), pode-se calcular a frequência amortecida (ω_d) associada ao sistema através da Equação 4.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4)$$

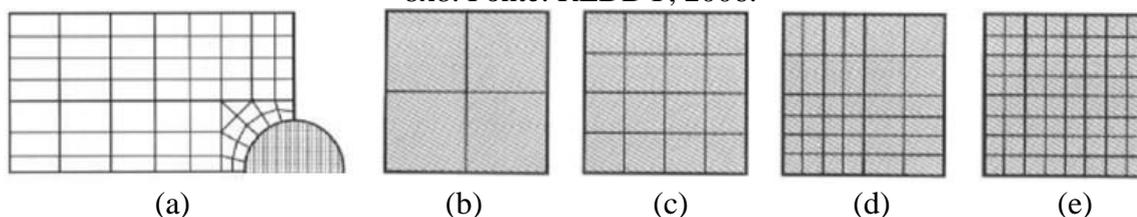
Com a constante de amortecimento crítico (Equação 2) e a razão de amortecimento (Equação 3), determina-se a constante de amortecimento do sistema pela Equação 5.

$$c = \zeta \cdot c_c \quad (5)$$

3.2.1. Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos objetiva simplificar a solução de problemas complexos, com isso é possível encontrar uma solução aproximada ao invés de uma exata. O método se baseia na divisão do corpo analisado em diversos corpos menores, que estão interconectados, sendo esses denominados como elementos (Figura 4). O princípio do método é avaliar um pequeno elemento e propagar suas solicitações aos elementos vizinhos. O conjunto de elementos é denominado malha, e esta pode ser refinada para um melhor resultado, porém conforme maior o refinamento, maior será a requisição de capacidade computacional, segundo (REDDY, 2006).

Figura 4 - Representação de malha: (a) Refino de malha na área de contato; (b) Malha uniforme 2x2; (c) Malha uniforme 4x4; (d) Malha não-uniforme 6x6; (e) Malha uniforme 8x8. Fonte: REDDY, 2006.



Com o auxílio de simulação numérica computacional, através de *softwares* comerciais (e.g. *Abaqus*®), é possível realizar a análise modal de uma estrutura. Este procedimento é baseado na determinação de autovalores e autovetores utilizados no cálculo de frequência natural e modos de vibrações. A configuração de análise de extração dos autovalores pode ser feita por diversos métodos, entre eles o Método de Lanczos, conforme descrito, por exemplo, em (CULLUM e WILLOUGHBY, 2002).

3.3. Sensores

O Simcenter LMS SCADAS XS (Figura 5) é o equipamento capaz de adquirir de dados para análise modal, por exemplo, o qual faz comunicação com os sensores. O equipamento

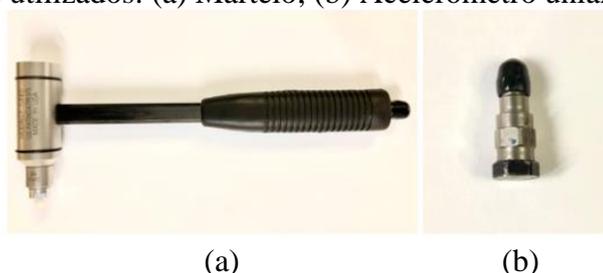
dispõe de recursos dedicados a processamento e pós-processamento da análise (SIEMENS, 2022).

Figura 5 - Equipamento Simcenter LMS SCADAS XS. Fonte: SIEMENS, 2022.



Segundo Ewins (2000), para aquisição de dados da análise modal, por exemplo, é utilizado um martelo para excitação forçada e um acelerômetro uniaxial para captação desta vibração forçada, como mostra a Figura 6 (EWINS, 2000).

Figura 6 - Sensores utilizados: (a) Martelo; (b) Acelerômetro uniaxial. Fonte: O Autor.



O martelo de impacto é o responsável pela vibração forçada imposta sobre o componente a ser testado. O equipamento consiste em um conjunto de diferentes ponteiros e cabeças, os quais têm finalidade de estender as faixas de frequências e níveis de forças para atender exigências de diferentes estruturas. Para determinar a força aplicada sobre o sistema, o martelo faz uso de uma célula de carga ou um transdutor de força (RANDALL, 2011).

Para aquisição da vibração forçada imposta pelo martelo, um acelerômetro uniaxial é utilizado. Acelerômetro é um transdutor o qual retorna um sinal de resposta proporcional à aceleração. O mercado dispõe de diferentes tipos de sensores para aceleração, mas o mais comum utilizado para este tipo de monitoramento é o acelerômetro piezoelétrico, que utiliza as propriedades piezoelétricas de materiais como cristais e cerâmicas (RANDALL, 2011).

O acelerômetro utilizado no experimento tem sensibilidade de 9,99 mV/g e o martelo 7 mV/V, ambos da marca *PCB Piezotronics*.

3.4. Graxas

Graxas são uma mistura de óleos lubrificantes minerais com espessantes químicos como sais (Cálcio, Lítio, Sódio) e têm como finalidade diminuir o atrito entre superfícies. Em casos especiais, é utilizado o aditivo de extrema pressão em sua formulação, o qual reage com as superfícies formando uma película protetora de baixa resistência ao cisalhamento, assim reduzindo o atrito e o desgaste (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000).

As consistências de graxas são determinadas por teste de penetração de cone, baseado na Norma ASTM D210, e suas faixas são estabelecidas como grau NLGI (*National Lubricating Grease Institute*) (NLGI, 2017), como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de graxas por grau NLGI. Fonte: NLGI, 2017.

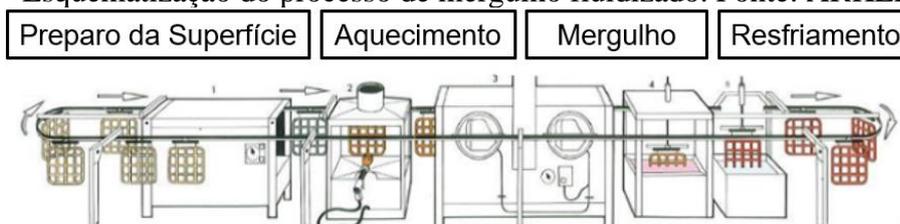
Grau NLGI	Faixa de penetração [25°C]
000	445-475
00	400-430
0	355-385
1	310-340
2	265-295
3	220-250
4	175-205
5	130-160
6	85-115

3.5. Revestimento glidecote

Comumente utilizado na indústria automobilística em pontas de eixos, o revestimento Glidecote é constituído de uma base de poliamida (Rilsan PA11), e sua finalidade principal é diminuir o atrito entre superfícies de contato e o ruído, de acordo com (ARKEMA, 2022).

O processo de mergulho fluidizado baseia-se em pré-aquecer a peça e mergulhá-la em um tanque com pó de poliamida suspenso por fluxo de ar, como mostra a Figura 7 (ARKEMA, 2022). Neste momento a poliamida derrete no contato com a peça aquecida e adere ao componente.

Figura 7 - Esquemática do processo de mergulho fluidizado. Fonte: ARKEMA, 2022.



3.6. Coifa sanfonada polimérica

A coifa é um elemento com funcionalidade principal de proteger os componentes lubrificados no eixo de transmissão (SOMMER, 2009). Para a fabricação da coifa sanfonada (Figura 8) utiliza-se um polímero artificial com especificação técnica SAE J200.

Figura 8 - Coifa sanfonada polimérica. Fonte: O Autor.



3.7. Instrumentação

Para aquisição de dados é necessária a inserção das informações referentes à sensibilidade do martelo e do acelerômetro no LMS SCADAS XS. Como os elementos piezoelétricos do acelerômetro tendem a se alterar com o tempo, é necessário fazer a calibração do mesmo. O acelerômetro é fixado em um *shaker* (agitador) com frequência conhecida e, após este procedimento, o agitador é posto em funcionamento e é feita uma aquisição de 10 segundos para obter a sensibilidade atual do acelerômetro. Em seguida é feita a colagem no acelerômetro no centro da peça.

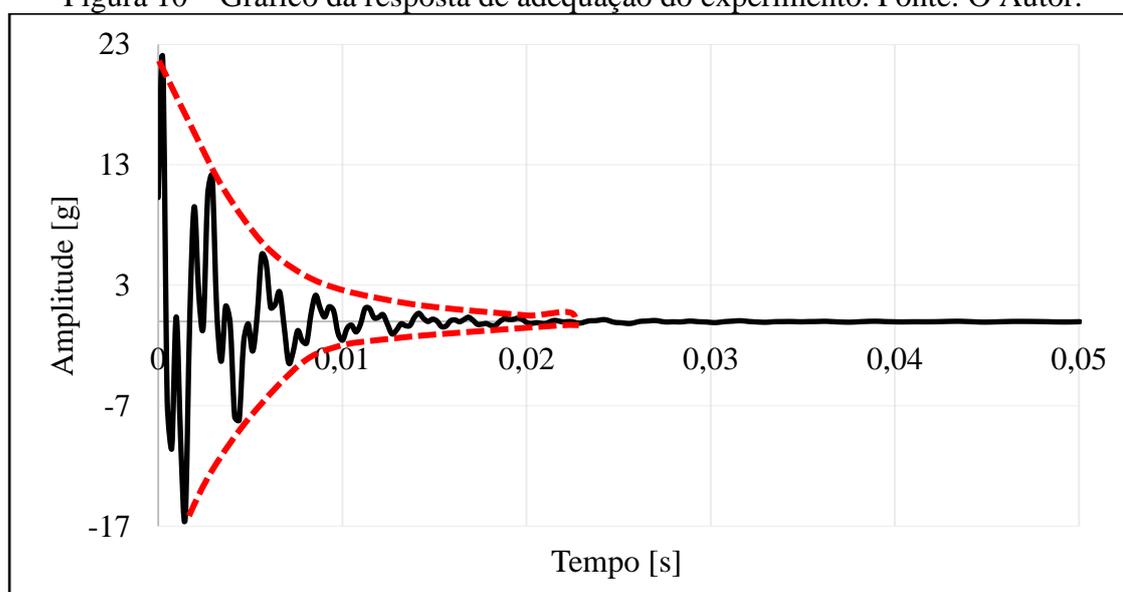
Após a calibração é feita a montagem do ensaio para a condição aplicada no veículo, que é feito com o uso de dois suportes chamados de *Tombstone* (Lápide), devido ao seu formato e alta robustez. Com o auxílio de oito parafusos, o eixo é fixado pelos flanges na estrutura, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Montagem do ensaio do eixo de transmissão (Fixo-Fixo). Fonte: O Autor.



Na aba *Impact Setup*, do LMS SCADAS, é feita a adequação do sistema completo, ou seja, configuração original do eixo, acelerômetro, martelo e os suportes de fixação. Nesta etapa, são impressas algumas batidas com o martelo sobre o eixo para que haja uma adequação da montagem em relação às batidas e às respostas de aceleração. A Figura 10 mostra o decremento da resposta de amplitude associada à essa adequação do sistema.

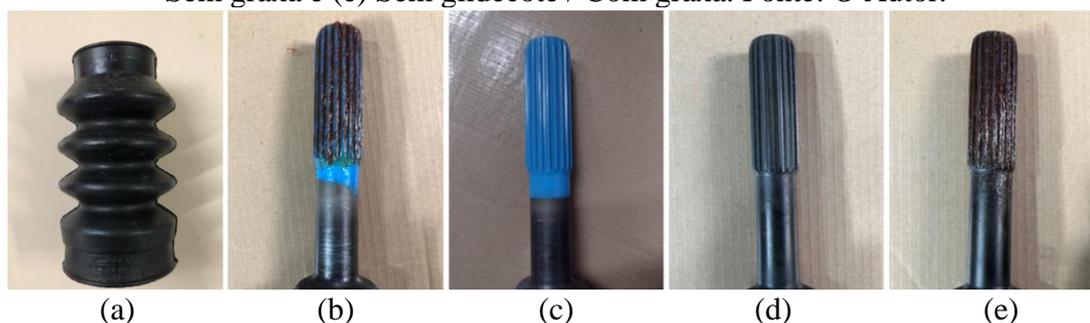
Figura 10 – Gráfico da resposta de adequação do experimento. Fonte: O Autor.



A ordem proposta para o ensaio do eixo de transmissão, começa pela montagem completa do eixo, ou seja, sua forma original (Figura 1 (b)). Posteriormente, foi feita a retirada gradativa dos elementos de montagem para avaliar a mudança da resposta em frequência natural, seguindo a seguinte ordem de retirada: Vedação, graxa, glidecote.

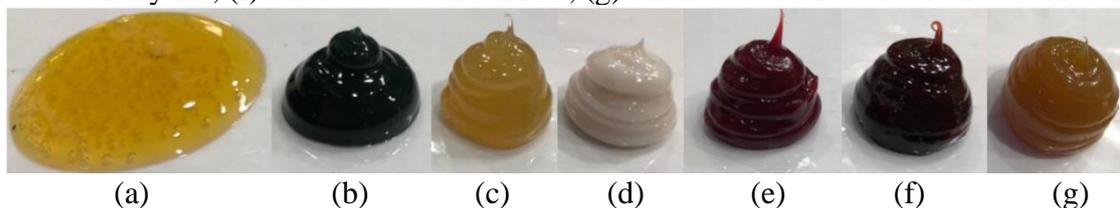
Na etapa de análise do eixo sem vedação/com graxa (Figura 11 (b)) foi realizada a análise da variação das graxas em diferentes viscosidades e consistências. A Figura 11 apresenta uma visão geral da sucessão de análise do eixo de transmissão.

Figura 11 - Ordem de análises na variação dos elementos no eixo: (a) Vedação (eixo completo); (b) Sem vedação / Com graxa; (c) Sem graxa / Com glidecote; (d) Sem glidecote / Sem graxa e (e) Sem glidecote / Com graxa. Fonte: O Autor.



Para a análise na variação de graxas, foram utilizados sete tipos diferentes. A Figura 12 apresenta as graxas utilizadas no experimento.

Figura 12 - Graxas utilizadas no experimento: (a) Klüber Centoplex GLP 500; (b) Ipiranga Litholine CA; (c) Quaker Houghton Cosmolube; (d) Klüber Isoflex NBU 15; (e) Chevron Ultra Duty EP; (f) Shell Gadus S2 V220C; (g) Shell Gadus S2 V460. Fonte: O Autor.



A Tabela 3, apresenta informações de fabricantes, propriedades e os tipos de graxas utilizadas no experimento para os parâmetros de variação de viscosidades, onde utilizou-se graxas de consistências NLGI 2.

Tabela 3 - Graxas com diferentes viscosidades utilizadas no experimento. Fonte: O Autor.

Descrição	Fabricante	Viscosidade 40°C [cSt]	Anexo
Isoflex NBU 15	Klüber	21	4
Gadus S2 V220	Shell	222	6
Ultra Duty EP	Chevron	400	1
Gadus S2 V460	Shell	460	6

A Tabela 4, apresenta informações em relação ao fabricante, propriedades e os tipos de graxas utilizadas no experimento para os parâmetros de variação de consistências NLGI.

Tabela 4 - Graxas com diferentes consistências utilizadas no experimento. Fonte: O Autor.

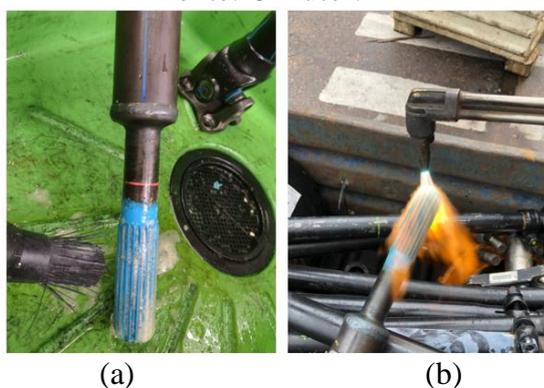
Descrição	Fabricante	Consistência NLGI	Anexo
Centoplex	Klüber	00	5
Litholine	Ipiranga	0	3
Cosmolube	Quaker Houghton	1	2
Ultra Duty	Chevron	2	1

3.8. Limpeza do componente

Para aquisição de dados para diferentes tipos de viscosidades e consistências de graxa (Figura 11 (b)), é necessário realizar a limpeza dos componentes de contato (Luveira e ponta de eixo) com processo adequado para a troca de graxa. Para isso, utiliza-se uma escova e sabão para remover a graxa da região lubrificada, como mostra a Figura 13 (a).

Para a etapa de análise da influência de glidecote na análise modal (Figura 11 (d)), é feita a remoção do revestimento da ponta de eixo do cardan com o auxílio de um maçarico, como mostra a Figura 13 (b).

Figura 13 - Processo de limpeza: (a) Remoção de graxa; (b) Remoção do glidecote.
Fonte: O Autor.



3.9. Aquisição de dados

Para aquisição de análise modal experimental é utilizado o *Impact Testing* e para avaliação dos resultados, foi utilizado o *PolyMax*, ambos recursos disponíveis no LMS SCADAS XS (Figura 5).

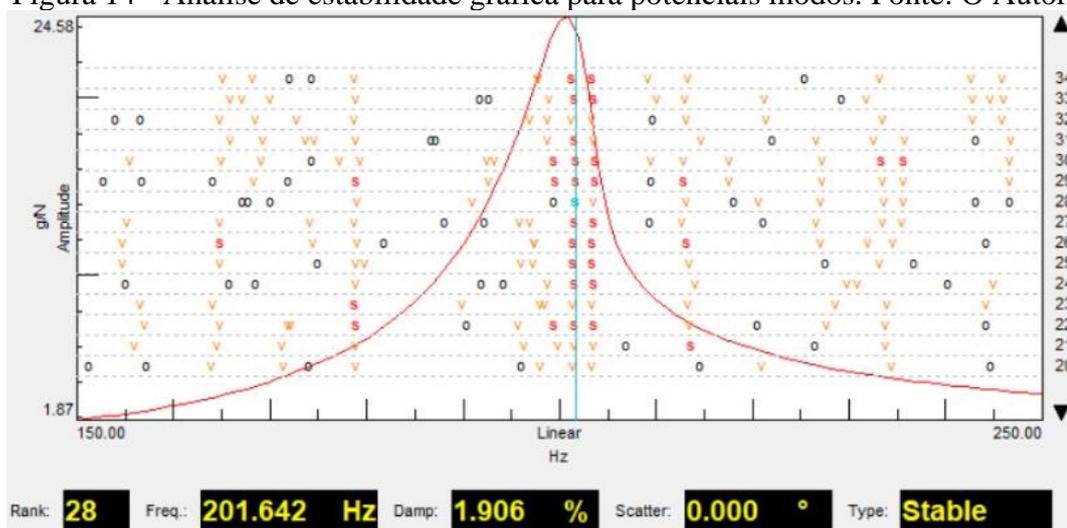
- *Impact Test*: é o módulo responsável pela aquisição de dados, juntamente aos sensores martelo e acelerômetro (Figura 6).
- *PolyMax*: recurso responsável pela análise de dados das aquisições. Neste recurso é feita a análise de estabilização gráfica do pico de frequência encontrado, como pode ser visto na Figura 14.

Para garantir uma repetibilidade nos resultados para as diferentes modificações feitas na montagem no eixo de transmissão (vedação, graxas e glidecote) foram feitas três repetições das medições para as mesmas e calculada a média.

Utilizando a ferramenta *PolyMax*, conjuntamente com a ferramenta auxiliar *Automatic Modal Parameter Selection* (Seleção Automática de Parâmetro Modal), é possível localizar e verificar potenciais modos de vibração da aquisição, no qual apresenta letras em segmentos verticais. O recurso analítico faz uma análise comparativa com a linha horizontal anterior, em outras palavras, quanto maior a repetibilidade da letra apresentada mais preciso é o resultado.

A letra que apresenta o potencial modo é representado pela letra S, no qual significa Stable (Estável), como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Análise de estabilidade gráfica para potenciais modos. Fonte: O Autor.

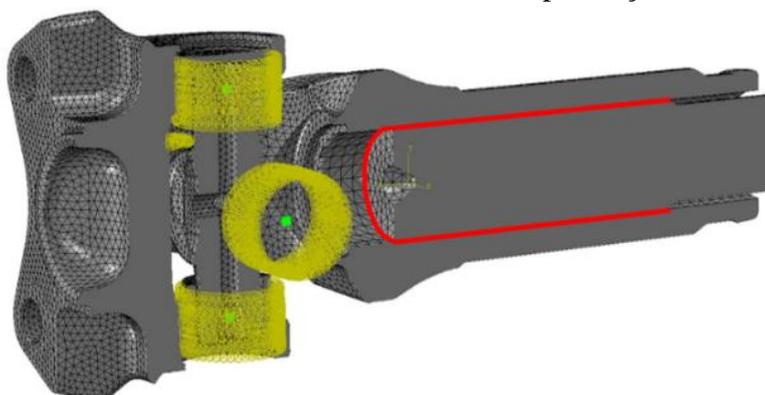


3.10. Simulação numérica

Com o auxílio de simulação numérica, é feita a análise modal do eixo de transmissão para determinar a frequência natural do componente. Para isso, é feita uma simplificação no modelo 3D do eixo, onde não se considera a coifa sanfonada, graxa e glidecote. Essas simplificações no modelo são feitas devido ao comportamento não-linear associado a esses elementos como contato, grandes deslocamentos e não linearidade material.

Para determinar a frequência natural do componente foi utilizado o *software* de simulação *Abaqus®*. Na Figura 15, destaca-se as simplificações e as restrições utilizadas na análise.

Figura 15 - Vista em corte do eixo cardan com malha e simplificações. Fonte: O Autor.



Em vermelho, é possível notar que o contato entre as superfícies é uniforme e não há espaço entre as partes deslizantes.

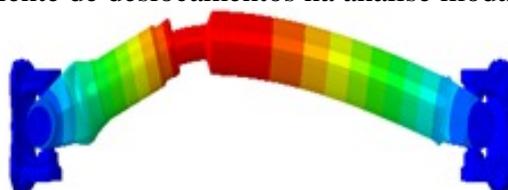
Em amarelo, se destaca as restrições nas regiões de contato rotativo, sendo utilizadas restrições de amarração em um nó rígido de acoplamento cinemático, onde são atribuídos os graus de liberdade.

4. RESULTADOS

4.1. Análise modal – Variações estruturais de montagem

Com a análise numérica realizada no *Abaqus*® encontrou-se uma frequência natural de 238,55 Hz. A Figura 16 apresenta o eixo em seu modo de vibração.

Figura 16 - Gradiente de deslocamentos na análise modal. Fonte: O Autor.



A validação das simplificações feitas no modelo é justificada com a comparação da frequência natural encontrada experimentalmente no valor de 248,44 Hz. O comparativo entre os métodos apresenta uma diferença percentual de 3,98%. Essa diferença percentual pode ser explicada pelo fato de a simplificação na simulação numérica preencher o vazio entre as partes deslizantes de maneira uniforme, fazendo com que haja uma continuidade no sistema.

Para o cálculo de diferença percentual entre as variações feitas na montagem, é utilizado como referência o valor de 248,44 Hz da frequência natural encontrado no conjunto original do eixo de transmissão.

A Tabela 5 apresenta as frequências naturais encontradas para cada caso estudado na análise modal experimental (Apêndice 1).

Tabela 5 - Resultados de frequências naturais para variação de montagem. Fonte: O Autor.

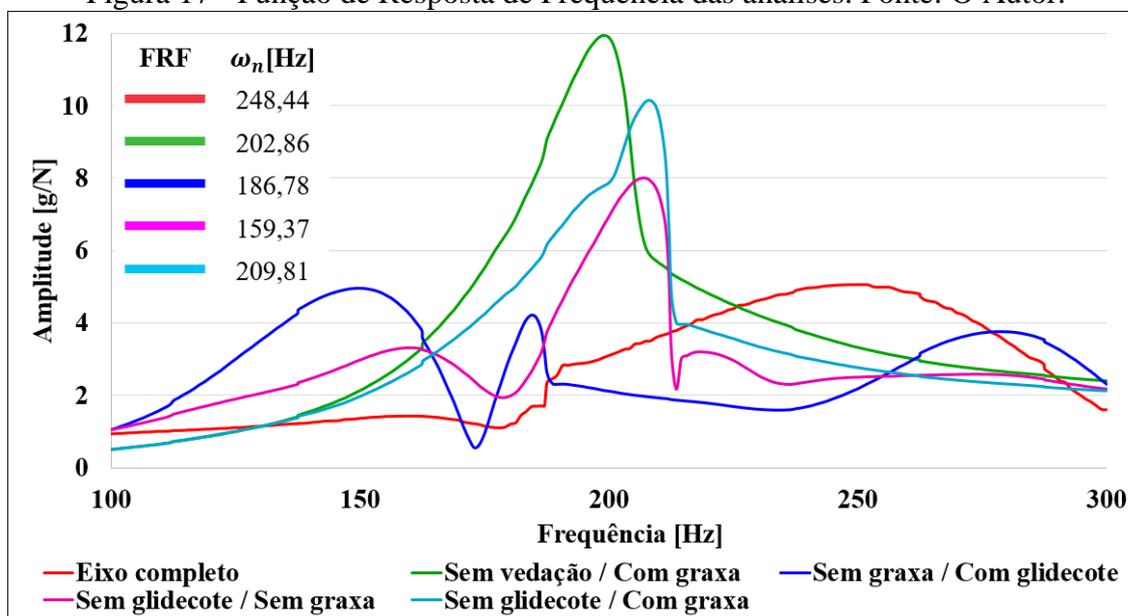
Parâmetro	Frequência [Hz]	Diferença [%]
Conjunto original	248,44	Referência
Sem vedação / Com graxa	202,86	18,35
Sem graxa / Com Glidecote	186,78	24,82
Sem Glidecote / Sem graxa	159,37	35,85
Sem Glidecote / Com graxa	209,81	15,55

A partir da resposta de frequência natural para cada caso analisado, pode-se calcular a razão de amortecimento das mesmas utilizando a Equação 4 do método da meia-potência. Na Figura 17 é apresentado a FRF (Função de Resposta em Frequência) de cada caso e suas respectivas frequências naturais.

Com o recurso *PolyMax* e a *Seleção Automática de Parâmetro Modal*, do LMS SCADAS XS, é feita a avaliação de cada pico apresentado na Função de Resposta de Frequência para

cada caso analisado. É possível verificar na Figura 17 que surge mais de um pico em algumas FRF, desta forma é feita a avaliação de estabilidade do pico de frequência que apresenta a maior estabilidade do parâmetro modal, apresentado na Figura 14.

Figura 17 - Função de Resposta de Frequência das análises. Fonte: O Autor.



A partir das razões de amortecimento calculadas pela Equação 3, referente ao método da meia-potência, calcula-se a frequência amortecida pela Equação 4 e a constante de amortecimento pela Equação 5.

A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados para frequências amortecidas e a constante de amortecimento relacionados ao sistema para cada caso analisado.

Tabela 6 - Resultados de frequência amortecida e amortecimento associados às variações de montagem. Fonte: O Autor.

Caso	Parâmetro	ω_n [Hz]	ζ	ω_d [Hz]	c [N.s/m]
Eixo completo (com vedação)		248,44	0,1294	246,35	2767,30
Sem vedação / Com graxa		202,86	0,0463	202,64	808,50
Sem graxa / Com glidecote		186,78	0,0206	186,74	331,21
Sem glidecote / Sem graxa		159,37	0,1109	158,39	1521,38
Sem glidecote / Com Graxa		209,81	0,0431	209,62	778,40

Avaliando a influência dos elementos suplementares de montagem, a estrutura completa apresentou uma frequência de 248,44 Hz. Tomando esse valor como referência, a variação máxima na frequência natural se deu no caso sem glidecote/sem graxa, apresentando uma diferença de 35,85%, sendo considerado o pior caso. Este valor representa uma influência significativa para rotação crítica de um eixo de transmissão, visto que a rotação crítica do eixo é uma variável dependente da frequência natural.

4.2. Análise modal – Variação de lubrificantes

A graxa original utilizada para a lubrificação do eixo cardan é a Chevron Ultra Duty EP2, desta forma esta será a graxa referência para os cálculos de diferença percentual. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as variadas viscosidades (Apêndice 2) e na Tabela 8 é apresentado os resultados para análise em diferentes consistências utilizadas no experimento (Apêndice 3). É importante ressaltar que todos os resultados apresentados nessas tabelas estão usando como referência a graxa Chevron.

Tabela 7 - Resultados de frequências para diferentes viscosidades. Fonte: O Autor.

Lubrificante	Viscosidade [cSt]	Frequência [Hz]	Diferença [%]
Isoflex	21	202,94	0,04
Shell Gadus	222	201,14	0,85
Chevron Ultra Duty	400	202,86	Referência
Shell Gadus	460	206,97	2,03

Tabela 8 - Resultados de frequências para diferentes consistências. Fonte: O Autor.

Lubrificante	NLGI	Frequência [Hz]	Diferença [%]
Centoplex	00	208,70	2,88
Litholine	0	200,67	1,08
Cosmolube	1	203,86	0,49
Chevron Ultra Duty	2	202,86	Referência

Como pode ser visto, a análise modal para variação das graxas, tanto para viscosidade quanto para consistências, não apresentou uma diferença percentual significativa comparada à graxa referência. Esta baixa diferença, pode ser explicada pela hipótese de a análise ser feita em condições estáticas, pois o preenchimento da graxa no vazio entre as áreas deslizantes faz com que não haja uma variação na rigidez do sistema. Esta hipótese é comprovada pela resposta de frequência para os casos sem vedação/com graxa e sem glidecote/com graxa, o qual apresentaram valores de frequência muito próximos.

Em uma análise dinâmica as graxas que não contém a característica de extrema pressão, não suportariam as solicitações impostas, pois elas alteram seu comportamento em condições dinâmicas, sofrendo variações na viscosidade com a taxa de cisalhamento. Também há o fator de aquecimento devido ao contato entre as partes de contato (dentes de engrenamento). O aquecimento faz com que a graxa fique fluida e conseqüentemente fazendo com que a mesma seja expulsa das regiões de contato, e assim perdendo o seu beneficiamento tribológico. Essa perda de lubrificante faz com que o sistema opere sem graxa, resultando em um decréscimo na frequência natural do sistema seja alterada, a qual é comprovada neste trabalho pela resposta de frequência natural encontrada no caso sem vedação/sem graxa para variações estruturais de montagem.

5. CONCLUSÃO

Os objetivos propostos neste trabalho foram atendidos. Com o ensaio experimental, evidencia-se a importância da análise de vibrações mecânicas para a predição de fenômenos físicos, assim podendo desenvolver e otimizar produtos. Falhas mecânicas e catástrofes podem ser evitadas quando feito um estudo sobre fenômenos vibratórios.

Os resultados encontrados com os casos sem vedação e com graxa/sem glidecote, comprovam a hipótese sugerida na análise de variação das graxas de que o preenchimento do vazio com graxa nas partes deslizantes faz com que não haja uma variação significativa na rigidez do sistema, o qual apresentou pequenas variações na frequência natural para a análise em condições estáticas.

Um ponto a ser destacado é a evidência da importância da integridade dos elementos constituintes do eixo de transmissão. O decréscimo na frequência natural encontrado na variação dos parâmetros de montagem demonstra a necessidade de haver uma atenção redobrada a estes elementos, pois se houver a perda destes em operação no veículo poderá ocasionar sérios danos estruturais e conseqüentemente à vida humana, visto que os mesmos influenciam a rigidez e o amortecimento do sistema.

A comparação entre a análise experimental e a numérica apresentou uma baixa diferença percentual (3,98%), porém, constatou-se experimentalmente a grande influência da retirada dos elementos de montagem. Este fato deve ser levado em consideração ao fazer simplificações no modelo para realizar análises numéricas.

Portanto, pode-se concluir que a presença destes elementos suplementares na montagem do eixo faz com que a frequência natural seja elevada e, assim, permitindo uma segurança de que a mesma não será excitada em condições de trabalho.

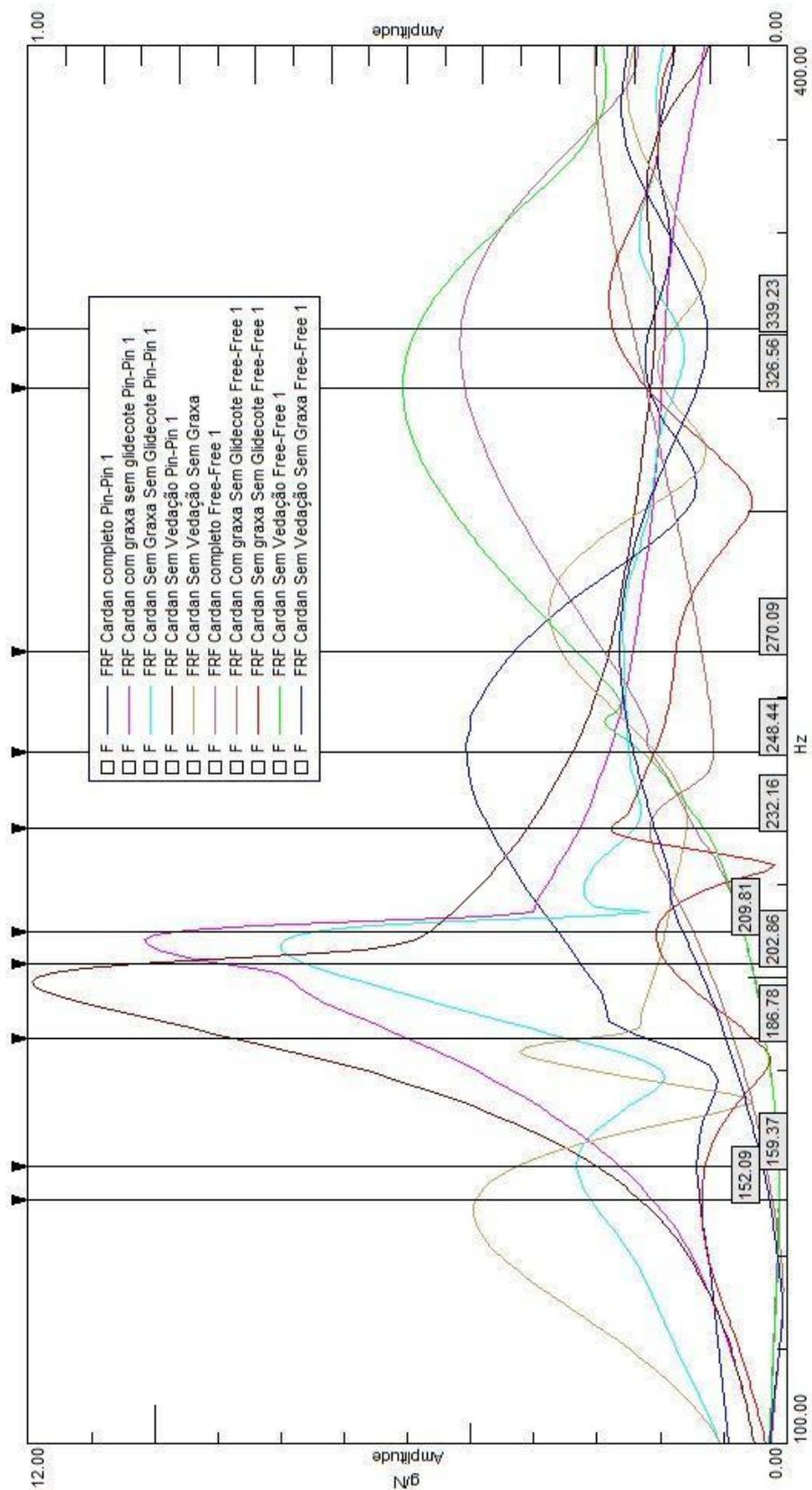
Para trabalhos futuros, sugere-se aplicar a mesma metodologia para outros tipos de eixos de transmissão e avaliar a resposta do sistema. Também, submeter o eixo avaliado neste trabalho em condições dinâmicas e avaliar a vibração torcional para as mesmas condições aplicadas na análise estática e realizar uma análise modal numérica sob condições não-lineares, ou seja, considerar a graxa e a coifa sanfonada e avaliar as possíveis respostas de frequência.

6. REFERÊNCIAS

- ARKEMA. **Fluidized Bed Dipping Process: rilsan fine powders. Rilsan Fine Powders.** 2022. Disponível em: <<https://hpp.arkema.com/en/product-families/rilsan-pa11/fluidized-bed-dipping/>>. Acesso em: 31 maio 2022.
- AU, Siu-Kui. **Operational Modal Analysis: modeling, bayesian inference, uncertainty laws.** Singapore: Springer, 2017. 552 p.
- CULLUM, Jane K.; WILLOUGHBY, Ralph A.. **Lanczos algorithms for large symmetric eigenvalue computations: vol. i - theory.** Philadelphia: Society For Industrial And Applied Mathematics, 2002.
- DANA. **Vida longa aos eixos cardan.** 2021. Disponível em: <<https://dana.com.br/dana-informa/vida-longa-aos-eixos-cardan/>>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- DANA. **Cardans: entendendo os eixos cardans.** Disponível em: <https://spicer.com.br/downloads/Spicer_Manual_Entendendo_Cardan.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022.
- EWINS, David John. **Modal Testing: theory, practice and application.** 2. ed. Hertfordshire: Research Studies Press Ltd, 2000. 574 p.
- HE, Jimin; FU, Zhi-Fang. **Modal Analysis.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 305 p.
- HOUGHTON. **Graxa Cosmolube EP1.** 2022. Datasheet disponibilizado via e-mail pela empresa Racing Tolua. Disponível em: info@racingtolua.com. Acesso em: 31 maio 2022.
- IPIRANGA. **Graxa Litholine CA.** 2022. Datasheet disponibilizado via e-mail pela empresa Pefil Comercial. Disponível em: comercial@pefil.com.br. Acesso em: 30 maio 2022.
- NLGI, National Grease Lubricating Institute. **A numerical scale for classifying the consistency of lubricating greases.** 2017. Disponível em: <<https://www.nlgi.org/grease-glossary/nlgi-grade/>>. Acesso em: 26 maio 2022.
- RANDALL, Robert Bond. **Vibration-based Condition Monitoring: industrial, aerospace and automotive applications.** United Kingdom: Wiley, 2011. 309 p.
- RAO, Singiresu S.. **Mechanical Vibrations.** 6. ed. Harlow: Pearson, 2018. 1291 p.
- REDDY, J. N.. **An introduction to the finite element method.** 3. ed. New York: Mc Graw Hill, 2006. 762 p.
- SIEMENS. **How to calculate damping from a FRF?** 2020. Disponível em: <<https://community.sw.siemens.com/s/article/how-to-calculate-damping-from-a-frf>>. Acesso em: 14 set. 2022.
- SIEMENS. **Simcenter SCADAS XS: everything you need to know!** 2022. Disponível em: <<https://community.sw.siemens.com/s/article/simcenter-scadas-xs-everything-you-need-to-know#feature>>. Acesso em: 29 maio 2022.
- SOMMER, John G.. **Engineered Rubber Products: Introduction to Design, Manufacture and Testing.** Munich: Hanser Publishers, 2009.
- STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W.. **ENGINEERING TRIBOLOGY.** 2. ed. Crawley: Butterworth-Heinemann, 2000. 769 p.
- TIMOSHENKO, Stephen. **Vibration Problems in Engineering.** 2. ed. New York: D. van Nostrand Company, 1937.

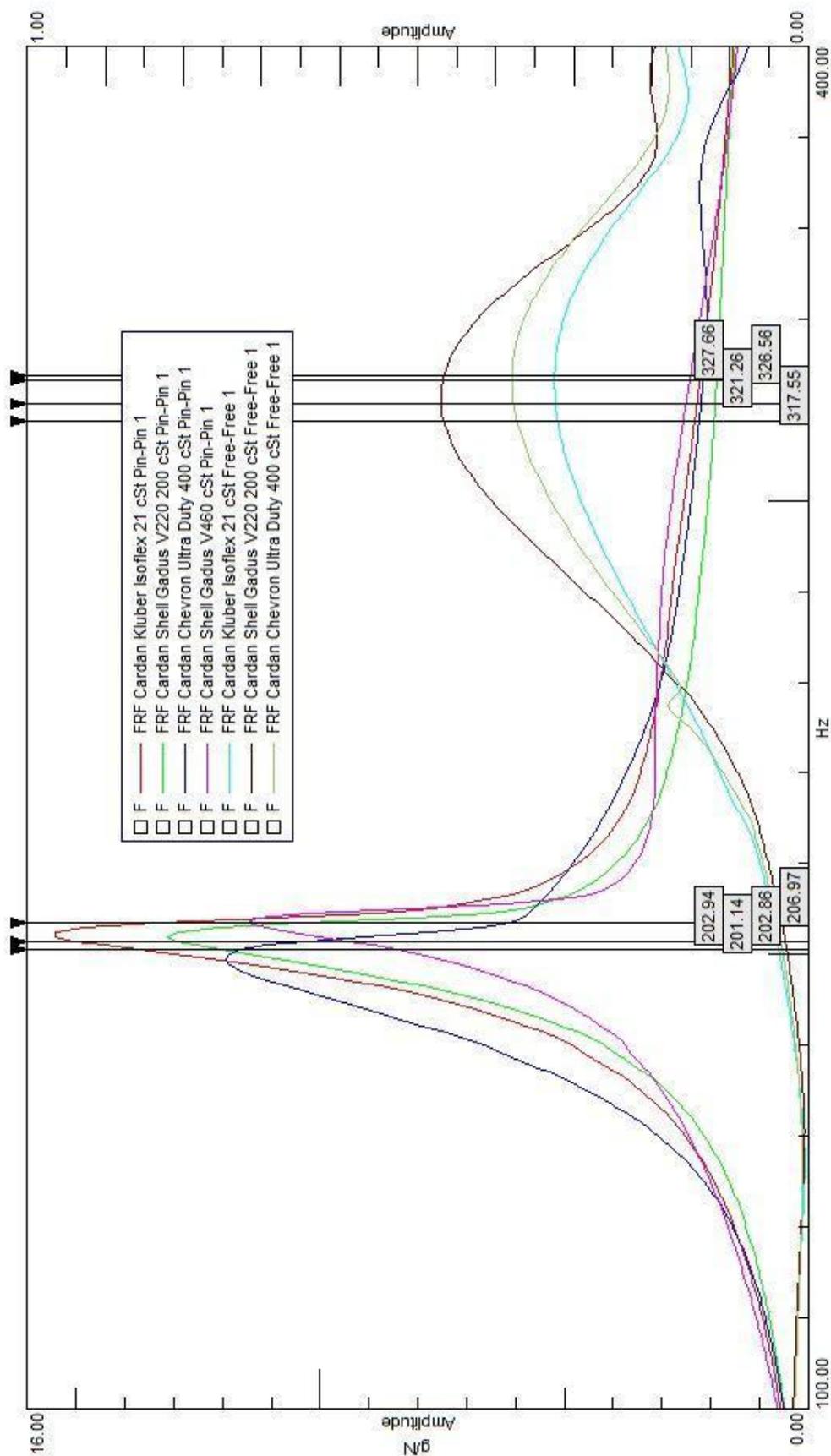
7. APÊNDICES

Apêndice 1 - Resultados gráficos para variação de parâmetros de montagem.



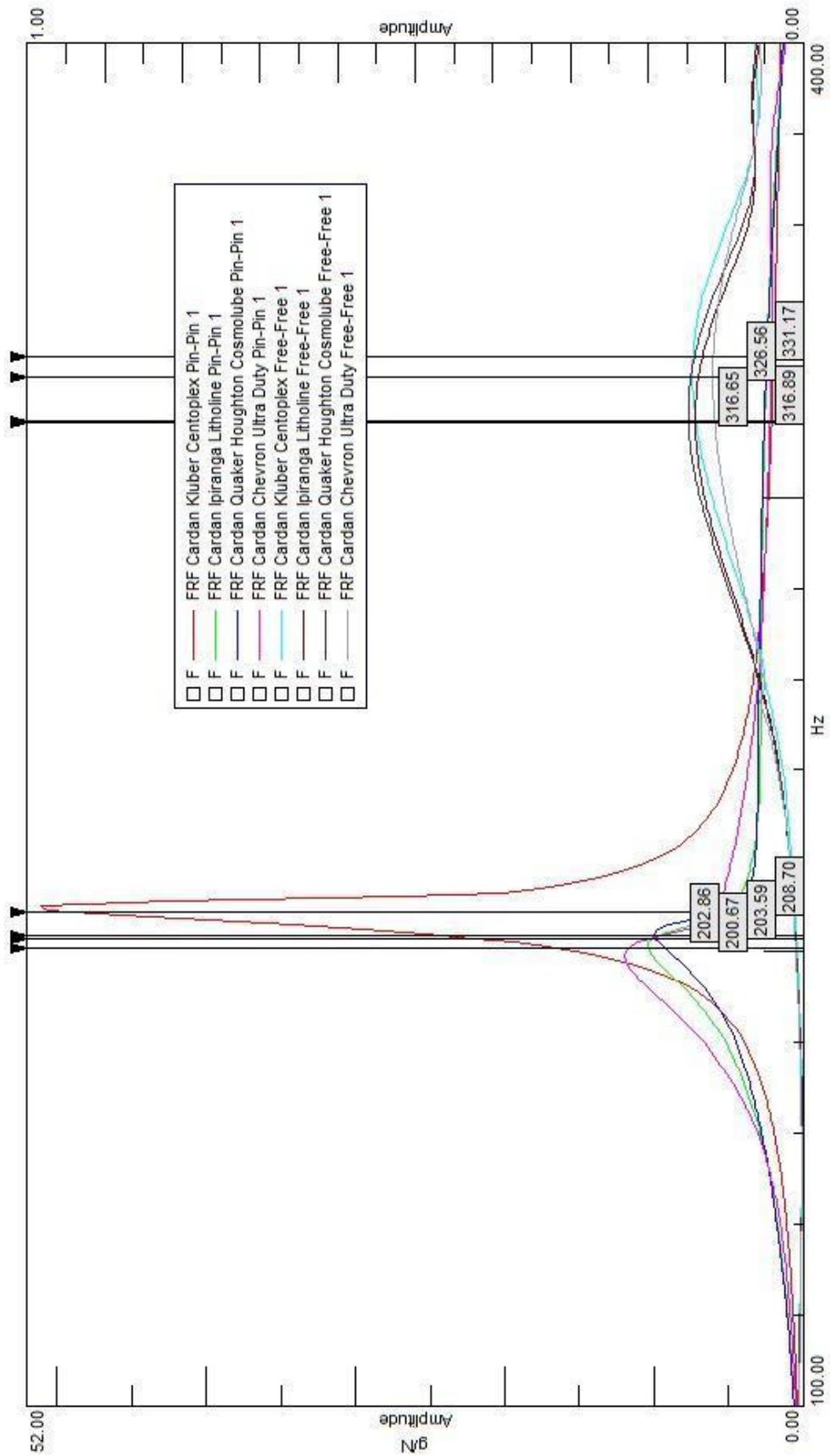
Fonte: O Autor.

Apêndice 2 - Resultados gráficos para graxas em diferentes viscosidades.



Fonte: O Autor.

Apêndice 3 - Resultados gráficos para graxas em diferentes graus NLGI.



Fonte: O Autor.

8. ANEXOS

Anexo 1 - Datasheet Chevron Ultra-Duty

<https://cglapps.chevron.com/msdspds/PDSDetailPage.aspx?docDataId=77100&docFormat=PDF>

Anexo 2 - Datasheet Quaker Houghton Cosmolube EP1

COSMOLUBE LI EP-1

Grasa lítica con aditivos Extrema Presión

DESCRIPCIÓN			SUMINISTRO																	
COSMOLUBE LI EP-1 es una grasa basada en aceite mineral parafínico, de alto grado de refino, espesada con jabón lítico y contiene aditivos antidesgaste, anticorrosivos y de extrema presión.			COSMOLUBE LI EP-1 se suministra habitualmente en envases de 45 y 185 kg.																	
<p>CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>ENSAYO</th> <th>VALOR TÍPICO</th> <th>METODICA ENSAYO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Color</td> <td>Marrón</td> <td>HI-102</td> </tr> <tr> <td>Consistencia NLGI</td> <td>1</td> <td>ISO-2137</td> </tr> <tr> <td>Penetración 25°C</td> <td>310/340</td> <td>ASTM D-217</td> </tr> <tr> <td>Carga Soldadura</td> <td>280 Kg</td> <td>ASTM D-2596</td> </tr> </tbody> </table>			ENSAYO	VALOR TÍPICO	METODICA ENSAYO	Color	Marrón	HI-102	Consistencia NLGI	1	ISO-2137	Penetración 25°C	310/340	ASTM D-217	Carga Soldadura	280 Kg	ASTM D-2596	<p>* Con licencia de HOUGHTON INTERNATIONAL INC.</p> <p>Nº edición: 3 Fecha revisión: 01/07-J.A.</p>		
ENSAYO	VALOR TÍPICO	METODICA ENSAYO																		
Color	Marrón	HI-102																		
Consistencia NLGI	1	ISO-2137																		
Penetración 25°C	310/340	ASTM D-217																		
Carga Soldadura	280 Kg	ASTM D-2596																		

Anexo 3 - Datasheet Ipiranga Litholine CA



LITHOLINE CA

Graxa de lítio, grau NLGI 0, contendo inibidores de oxidação e corrosão para a lubrificação de colheitadeiras de algodão.

A graxa LITHOLINE CA é recomendada para lubrificação de fusos, barras e engrenagens de acionamento dos eixos das colheitadeiras de algodão dos mais variados fabricantes de equipamentos.

É indicada ainda para a aplicação em sistemas centralizados de lubrificação industrial e em equipamentos que operem em altas rotações, quando requerido pelo fabricante uma graxa NLGI 0 com baixa viscosidade do óleo básico.

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS

	Unidades	
Grau NLGI		0
Cor	Visual	Verde
Espessante	-	Lítio
Penetração Trabalhada 60x a 25°C	mm/10	382
Viscosidade Cinemática Óleo Básico a 100°C	cSt	5,9
Viscosidade Cinemática Óleo Básico a 40°C	cSt	29,6
Ponto de Gota	°C	195

Anexo 4 - Datasheet Klüber Isoflex NBU 15

<https://www.klueber.com/br/pt/produtos-servicos/produtos/isoflex-nbu-15/9806/>

Anexo 5 - Datasheet Klüber Centoplex GLP 500

<https://www.klueber.com/br/pt/produtos-servicos/produtos/centoplex-glp-500/9816/>

Anexo 6 - Datasheet Shell Gadus

https://www.shell.com.br/promos/btb-products/gadus-product-range/_jcr_content.stream/1426853626868/afca5e9d7e6dfce4911d94a6beee839bf6a9c81a/shell-gadus-brochure.pdf

Anexo 7 – Informações de calibração LMS SCADAS XS

SIEMENS		SIEMENS 	
Calibration Date: 10-Mar-2020	Tech.: BHE	TYPE <input type="text" value="SC-XS12-A"/>	
Certificate #: 2020-11201401	Serial #: 11201401	S/N <input type="text" value="11201401"/>	Made in the Netherlands WLAN Device Name: LMS-SCADAS-XS-548F
		Li Ion 3.7V 4800mAh	