# ANÁLISE MODAL E HARMÔNICA DE ESFORÇOS MECÂNICOS EM DISCOS DE ACOPLAMENTO FLEXÍVEIS

RESUMO: *Apresenta-se analise modal e harmônica aplicada em discos de acoplamento flexíveis para transmissão de potência nos sistemas de geração em motores diesel, com potência nominal de 600 kW, afim de verificar os modos de vibração próximos da frequência de rotação nominal do gerador. Informações das caraterísticas mecânicas e da composição do material do disco foram previamente obtidas através de ensaios de tração e de espectrometria, realizados nos laboratórios da UNIFEI. Resultados dos modos de vibração foram obtidos através da solução numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos – FEM o material utilizado para a representação do disco foi o aço inox 1006 onde o módulo de elasticidade foi determinado através do ensaio médio de tração. Respostas das análises harmônicas foram obtidas com o objetivo de avaliar os modos de vibração que mais contribuem para a resposta dinâmica estrutural. Após a realização da análise modal e harmônica utilizando o valor médio do módulo de elasticidade encontrado no ensaio de tração realizou-se novas análises modais e harmônicas, variando o valor do módulo de elasticidade entre ± 5% até ± 30%, com os intervalos de 5%, para obter a relação tensão x deformação para a resposta harmônica do disco observando as amplitudes obtidas nas análises harmônicas.*

PALAVRAS-CHAVE: *DISCO DE ACOPLAMENTO FLEXÍVEL, ENSAIO DE TRAÇÃO, VIBRAÇÕES MECÂNICAS, SIMULAÇÃO NUMÉRICA, ANÁLISE MODAL, ANÁLISE HARMÔNICA.*

ABSTRACT: *A modal and harmonic analysis applied to flexible coupling discs for power transmission in generation systems through diesel engines (nominal power of 600 kW) is presented, in order to verify the vibration modes close to the nominal rotation frequency of the generator. Information on the mechanical characteristics and composition of the disc material were previously obtained through tensile and spectrometry tests, carried out in the laboratories of UNIFEI. Results of the vibration modes were obtained through the numerical solution using the Finite Element Method - FEM the material used for the representation of the disc was stainless steel 1006 where the modulus of elasticity was determined through the average tensile test. Harmonic analysis responses were obtained with the aim of evaluating the vibration modes that most contribute to the structural dynamic response. After performing the modal and harmonic analysis new modal and harmonic analyzes were performed, but varying the value of the modulus of elasticity between ± 5% to ± 30%, with the intervals from 5%. Therefore, it was possible to make a relationship between stress x strain for the harmonic response of disk, observing the amplitude values obtained in the harmonic analysis*.

KEYWORDS: *flexible coupling disc, tensile test, mechanical vibrations, numerical simulation, modal and harmonic analysis.*

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

*Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.*

## 1. INTRODUÇÃO

O comportamento dinâmico estrutural de estruturas e equipamentos vem ganhando destaque nas últimas décadas seja na comunidade científica ou na indústria. Nas estruturas mecânicas encontra-se um fenômeno chamado ressonância onde pequenas forças podem resultar em grandes deformações que podem introduzir algum tipo de dano ou comprometer o funcionamento da estrutura. A ressonância ocorre quando as frequências das forças atuantes no modelo de estudo coincidem com as frequências naturais das mesmas levando a grandes oscilações (RAO, 2008). Isso pode ser minimizado conhecendo o comportamento dinâmico estrutural do modelo. A ressonância é uma causa frequente, ou pelo menos um fator que contribui para muitos dos problemas de vibração e ruído que ocorrem na operação de máquinas e estruturas em operação. Para um melhor entendimento das questões de vibração é importante que os parâmetros relacionados ao comportamento dinâmico do modelo em estudo sejam identificados e quantificados.

Os modos de vibração são propriedades inerentes a uma estrutura e são determinados pelas *propriedades do material* (massa, rigidez e amortecimento) e pelas condições de contorno da estrutura. Cada modo é definido por uma frequência natural, amortecimento modal e forma de modo, isto é, por parâmetros modais. Se as propriedades do material ou as condições de contorno de uma estrutura mudar, esses modos mudarão. Por exemplo, se massa for adicionada à estrutura, ela irá vibrar diferente, onde provavelmente, para este caso, sua frequência natural terá seu valor diminuído (GUILLAUME, 2002). A análise modal é o estudo de propriedades dinâmicas por meio de excitações de vibração. Esses estudos são derivados de medições e análises da resposta dinâmica estrutural quando submetido a uma força externa. SCHWARZ (1999) descreve que, a análise modal experimental tornou-se popular desde o advento do analisador de espectro digital FFT (*Fast Fourier Transform*) no início dos anos 1970.

Atualmente, com os avanços tecnológicos, o uso de análise modal a partir de testes de impacto ou testes de resposta tornou-se uma forma rápida e econômica de encontrar os modos de vibração de máquinas ou estruturas. Segundo LUNDKVIST (2014), a análise modal experimental é uma análise de propriedades estruturais dinâmicas, esses parâmetros modais são identificados a partir da FRF (Função de Resposta em Frequência). Os parâmetros modais são as frequências naturais, taxas de amortecimento e modos de vibração (SCHWARZ, 1999). LUNDKVIST (2014) também descreve que o uso de modelos matemáticos dinâmicos pode ser utilizado para obter: conhecimento do comportamento estrutural ou sistêmico de acordo com o esforço dinâmico; suavizar e reduzir os dados por meio do ajuste da curva; simular ou prever quando houver esforços externos; após mudanças físicas em estruturas ou sistemas, possivelmente simulando a mudança

na dinâmica das características. Segundo CHUVAS (2012), os métodos de análise modal caracterizam-se pelo cálculo direto dos parâmetros modais da estrutura a partir dos registros no tempo de sua excitação e resposta. A estimativa experimental dos parâmetros modais da estrutura pode ser realizada diretamente a partir dos sinais medidos ou após processá-los. Isso pode ser feito no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

As palavras vibração ou oscilação são utilizadas para descrever movimentos alternados para frente e para trás. No entanto, no contexto deste documento, o termo vibração é usado para descrever sistemas mecânicos, nos quais os componentes de energia do sistema são a energia potencial e a energia cinética BALACHANDRAN (2009).

Na modelagem teórica, o comportamento estrutural do modelo pode ser estudado por diferentes metodologias, uma delas pode ser, por exemplo, o método dos elementos finitos (BATHE; WILSON, 1976; ZIENKIEWICZ, 1985). A modelagem de elementos finitos é atualmente usada na maioria das análises e projetos de sistemas mecânicos estruturais, porém o analista nem sempre é capaz de incluir todos os parâmetros e variáveis no modelo matemático e sua resposta é geralmente aproximada.

Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo estudar os esforços numéricos aplicados a um disco de acoplamento flexível para transmissão de potência nos sistemas de geração através de motores diesel, de forma a obter resultados referentes a uma analise modal e harmônica para verificar os modos de vibração próximos da frequência de rotação nominal do gerador. As Informações das caraterísticas mecânicas e da composição do material do disco foram obtidas através de ensaios de tração e de espectrometria, realizados nos laboratórios da UNIFEI e da IMBEL. As soluções numéricas foram realizadas com base no Método dos Elementos Finitos – FEM, o material utilizado para a representação do disco foi o aço inox 1006, que foi obtido da caracterização da composição do material. O módulo de elasticidade foi determinado através do ensaio médio de tração. As respostas das análises harmônicas foram obtidas com o objetivo de avaliar os modos de vibração que mais contribuem para a resposta dinâmica estrutural. Após a realização da análise modal e harmônica utilizando o valor médio do módulo de elasticidade encontrado no ensaio de tração, novas análises modais e harmônicas foram feitas variando o valor do módulo de elasticidade entre ± 5% até ± 30%, com os intervalos de 5%. Dessa forma, pode-se obter a relação entre tensão x deformação para a resposta harmônica do disco.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DO DISCO DE ACOPLAMENTO

O conhecimento sobre as condições que conduzem a falha de um material é fundamental para etapa de seleção de materiais em um projeto ou para realizar correções em um processo de

fabricação. É preciso conhecer as condições de contorno de um produto (esforços e o ambiente que o produto estará sujeito, por exemplo), as propriedades físicas e químicas dos materiais para que o projetista possa selecionar o material que oferecerá o melhor desempenho e segurança ao produto. Para este projeto foram realizados dois ensaios a fim de comparar e obter um resultado que mais se aproxima das características reais do material ensaiado. Então, foram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos tais como ensaio de tração e ensaio de espectrometria de emissão ótica, respectivamente. Através desses ensaios é possível obter dados a fim de evitar uma falha precoce do material ou verificar as causas que levaram o material a falhar. Os valores obtidos dos ensaios experimentais foram introduzidos como os parâmetros que definem o material para a solução numérica através do *Ansys* estrutural.

## 2.1. Ensaio de tração do corpo de prova do disco de acoplamento

As propriedades mecânicas do material do disco de acoplamento são necessárias para obter o comportamento modal pelo método de simulação numérica. As propriedades que são medidas por meio de um teste de tração são a resistência a tração final, a resistência à ruptura, o alongamento máximo e a redução da área. A partir dessas medições, podem ser determinadas: módulo de Young, coeficiente de Poisson, resistência ao escoamento e a característica de endurecimento por deformação.

Os corpos de prova foram em cortados de um disco de acoplamento de diâmetro de 0,6 m e espessura de 2 mm, logo após, usinados seguindo uma geometria padronizada para testes de tração de materiais metálicos, ASTM E8M. Foram fabricados cinco corpos de prova via processo de usinagem por controle numérico computadorizado (CNC), conforme Figura 1.

FIGURA 1. Amostra fabricada por usinagem CNC. Fonte: Os autores (2020).

O ensaio de tração foi realizado na Máquina Universal de Ensaios INSTRON® modelo 8874- no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos – LEN da UNIFEI, conforme Figura 2a. Esta máquina possui atuador biaxial linear / rotativo e capacidade de até ± 25 kN de força axial e ± 100 Nm de torque. A força aplicada neste ensaio é uma força de tração crescente (uniaxial) até a fratura da amostra. Para este propósito, o corpo de prova de tração é fixado na máquina de ensaio universal e, em seguida, o alongamento é medido em função da força de tração (Vide Fig. 2a e 2b).

FIGURA 2a. Máquina de teste de tração universal INSTRON® modelo 8874. Fonte: Os autores (2020).

FIGURA 2b. Fratura dúctil de cinco corpos de prova. Fonte: Os autores (2020).

A fratura de tração de uma amostra dúctil ocorre quando as tensões excedem a resistência à tração normal do material, resultando em falha após a deformação plástica. Na fratura dúctil, há absorção de grandes quantidades de energia e propagação lenta antes que a fratura ocorra.

A Figura 2b mostra o comportamento de fratura por tração dos cinco corpos de prova onde se observa a formação e propagação da trinca num ângulo de aproximadamente 45º em relação a tensão normal aplicada.

Os diagramas dos cinco corpos de prova foram obtidos com o auxílio do software ScyDABis®, e o corpo de prova nº 5 é apresentado na Figura 3.

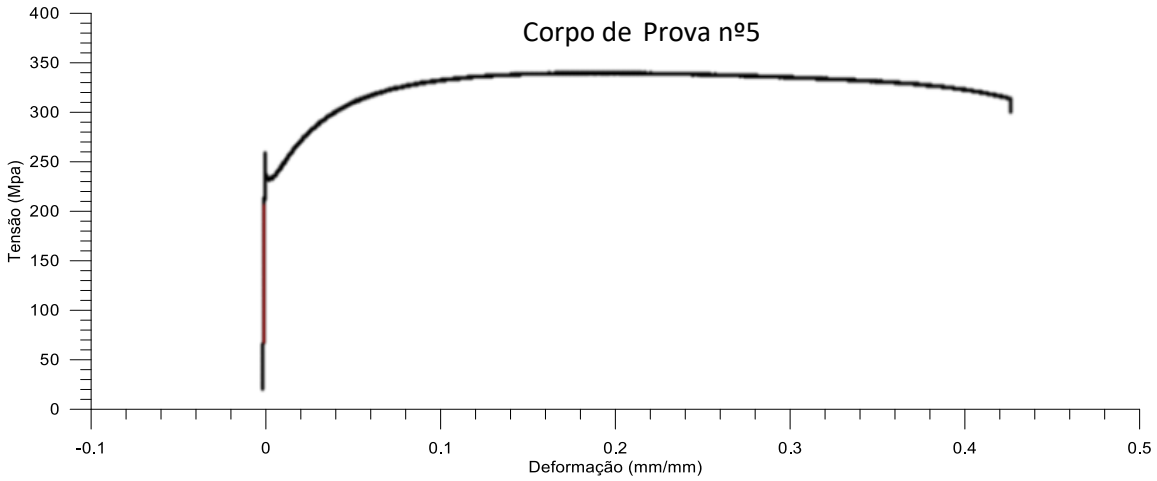



FIGURA 3. Curva de tensão *x* deformação do corpo de prova nº 5. Fonte: Os autores (2020).

As curvas representam a relação entre tensão e deformação em um determinado material, obtido aplicando gradualmente carga a um corpo de teste e medindo a deformação, assim são reveladas muitas das propriedades de um material, como o módulo de Young (ou módulo de elasticidade), a resistência ao escoamento e a resistência à tração final.

O módulo de Young foi determinado por meio de regressão linear entre dois pontos escolhidos aleatoriamente na região elástica do material, já a tensão de escoamento foi obtida por meio da função do *software "data reader"* que permite avaliar o valor em um ponto específico da curva.

O material dúctil pode ser visto como deformado significativamente antes da fratura. Há uma longa região entre a resistência ao escoamento e a resistência final, onde o material é endurecido por deformação. Há também uma longa região entre a resistência final e a fratura na qual a área da seção transversal do material está diminuindo rapidamente e o estrangulamento está ocorrendo. A média das propriedades mecânicas dos cinco corpos de prova é mostrada na Tabela 1.

**TABELA 1.** Propriedades mecânicas dos cinco corpos de prova.

| Corpos de prova | E (Módulo de Elasticidade) [Gpa] | $\sigma_e$ (Tensão do Escoamento) [Mpa] | $\sigma_u$ (Tensão Máxima) [Mpa] | $\sigma_r$ (Tensão de Ruptura) [Mpa] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 213,83 | 273,88 | 349,34 | 318,82 |
| 2 | 213,15 | 264,50 | 349,88 | 280,06 |
| 3 | 220,20 | 262,00 | 349,23 | 311,20 |
| 4 | 214,06 | 258,15 | 349,85 | 247,92 |
| 5 | 218,32 | 260,81 | 346,72 | 319,99 |
| Média | 215,91 | 263,87 | 349,00 | 295,60 |

## 2.2. Ensaio de espectrometria – ensaio mecânico não destrutivo

O ensaio de espectrometria foi realizado na Indústria de Material Bélico do Brasil – IMBEL. Por meio do analisador de espectrometria, conforme Figura 4, obtiveram-se os elementos químicos da composição do material do disco. Para essa análise, utilizou-se um analisador de metais fixo – SPECTROMAXX – usado principalmente para testes de materiais em fundições e para inspeções de entrada e saída em diversas indústrias. O analisador determina os elementos químicos que compõe um material metálico, tais como, carbono, fósforo, enxofre e nitrogênio.

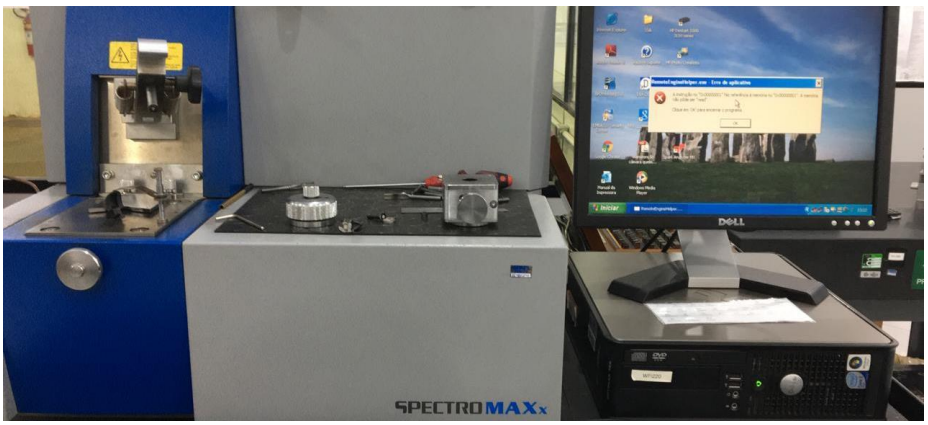



FIGURA 4. Analisador de espectrometria SPECTROMAXX- laboratório de ensaios mecânicos da IMBEL. Fonte: Os autores.

A Tabela 2 mostra as concentrações dos elementos químicos contidos no material do disco. Os seguintes elementos foram encontrados no material: carbono, silício, manganês, fosforo, enxofre, cromo, níquel, molibdênio.

TABELA 2. Concentração dos elementos químicos presentes no material do disco de acoplamento (gerador Stamford P7E).

| Nr. | C % | Si % | Mn % | P % | S % | Cr % | NI % | Mo % | Al % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,049 | 0,015 | 0,227 | 0,014 | 0,0064 | 0,019 | 0,022 | 0,0020 | 0,064 |
| 2 | 0,049 | 0,014 | 0,230 | 0,015 | 0,0065 | 0,019 | 0,023 | 0,0020 | 0,066 |
| 3 | 0,050 | 0,014 | 0,228 | 0,015 | 0,0067 | 0,019 | 0,024 | 0,0020 | 0,066 |
| 4 | 0,053 | 0,015 | 0,221 | 0,015 | 0,0072 | 0,019 | 0,025 | 0,0020 | 0,061 |
| 5 | 0,045 | 0,014 | 0,217 | 0,015 | 0,0077 | 0,019 | 0,022 | 0,0020 | 0,064 |

| Nr. | Cu % | Co % | TI % | Nb % | V % | W % | Pb % | Mg % | B % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,020 | 0,0039 | 0,0010 | 0,040 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0030 | 0,0010 | 0,0026 |
| 2 | 0,020 | 0,0045 | 0,0010 | 0,040 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0030 | 0,0010 | 0,0027 |
| 3 | 0,020 | 0,0046 | 0,0010 | 0,040 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0030 | 0,0010 | 0,0029 |
| 4 | 0,020 | 0,0044 | 0,0010 | 0,040 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0030 | 0,0010 | 0,0025 |
| 5 | 0,020 | 0,0038 | 0,0010 | 0,040 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0030 | 0,0010 | 0,0025 |

| Nr, | Sn % | Zn % | As % | Bl % | Ca % | Ce % | Zr % | La % | Fe % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,0010 | 0,036 | 0,0064 | 0,0020 | 0,0004 | 0,0030 | 0,0015 | 0,0010 | 99,0 |
| 2 | 0,0010 | 0,036 | 0,0072 | 0,0020 | 0,0004 | 0,0030 | 0,0015 | 0,0010 | 99,2 |
| 3 | 0,0010 | 0,036 | 0,0076 | 0,0020 | 0,0004 | 0,0030 | 0,0015 | 0,0010 | 99,2 |
| 4 | 0,0010 | 0,036 | 0,0067 | 0,0020 | 0,0008 | 0,0030 | 0,0015 | 0,0010 | 97,5 |
| 5 | 0,0010 | 0,036 | 0,0075 | 0,0020 | 0,0005 | 0,0030 | 0,0015 | 0,0010 | 98,6 |

* Método utilizado Fe-01-F, Base de ferro –orientativo –F 1264B6/08, para análises singulares.

### 2.3. Análise dos resultados dos ensaios destrutivos e não destrutivos

De acordo com os ensaios realizados com o material dos discos, obtiveram-se propriedades mecânicas já citadas anteriormente tais como, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e o limite de resistência à tração (tensão máxima).

Por comparação com a literatura, notou-se resultados muito próximos ao do Aço AISI 1006, um aço com baixo teor de carbono. Na Tabela 3, apresentam-se na primeira coluna os valores obtidos nos ensaios e na segunda coluna, as propriedades do aço AISI 1006.

**TABELA 3.** Comparação dos valores médios obtidos em laboratório com valores da literatura.

| | Valores obtidos em laboratório | Aço ANSI 1006 |
|---|---|---|
| E (Módulo de Elasticidade) | 215,91 Gpa | 206 Gpa |
| $\sigma_e$ (Tensão do Escoamento) | 263,87 Mpa | 285 Gpa |
| $\sigma_u$ (Tensão Máxima) | 349,00 Mpa | 330 Gpa |
| $\sigma_r$ (Tensão de Ruptura) | 295,60 Mpa | - |

## 3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE MODAL

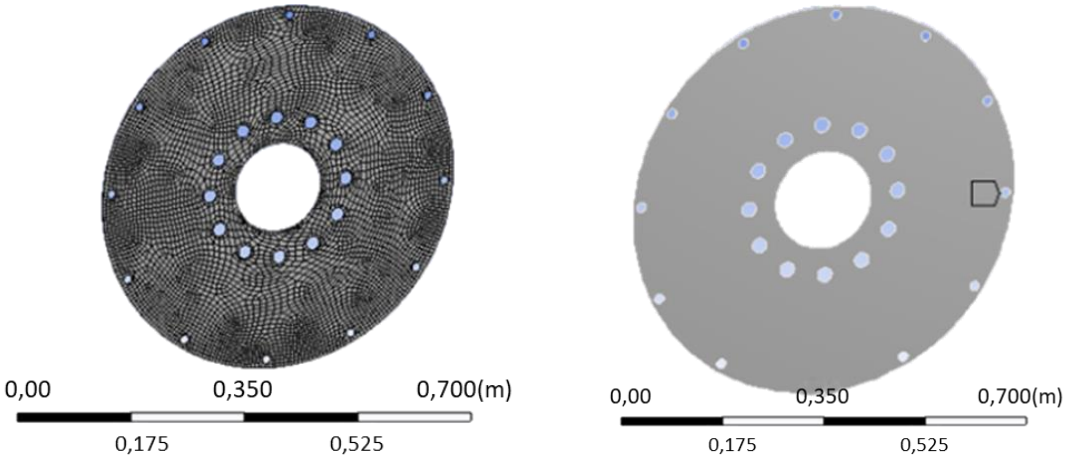
A análise modal é um processo usado para determinar as propriedades mecânicas de um sistema. Um sistema mecânico possui frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração, com essas propriedades pode-se formular o modelo matemático o qual representará o comportamento dinâmico de uma estrutura ou componente matemático.

Esta análise é relativamente simples quando realizada em componentes básicos, mas pode ser extremamente complicada quando realizada em elementos ou estruturas complexas, expostas a várias cargas externas.

O Método dos Elementos Finitos, mais conhecido como FEM (*finite elements methods*), surgiu da necessidade de resolver problemas complexos de análise estrutural. Em geral, o FEM consiste em discretizar estruturas complexas, ou seja, dividir geometrias complexas em quantidades finitas de elementos geométricos simples, obtendo geometrias equivalentes, tornando uma análise o mais próxima possível da realidade.

Assim sendo, são utilizados programas comerciais que utilizam o método dos elementos finitos, para o levantamento do projeto mecânico e para as análises numéricas, tais como *SolidWorks®* e *Ansys Workbentch®*, respectivamente, de forma que sejam possíveis realizar as análises modais e estruturais no disco de acoplamento entre o volante e o gerador.

As propriedades mecânicas do material foram consideradas nos estudos preliminares como AÇO INOXIDÁVEL **ANSI 1006.** A malha foi gerada utilizando-se a preferência física do tipo CFD com elementos hexaédricos de forma não estruturada, onde os elementos da malha se dispõem de forma harmônica no formato curvilíneo causando assim a acomodação de forma idêntica dos elementos, com 14988 nós e 7113 elementos, conforme mostrado na Figura 5 (a).




(a) (b)

**FIGURA 5.** Malha de elementos finitos no disco (a); condição de contorno no disco (b). Fonte: os autores (2021).

Para as análises modais foi aplicada a condições de contorno de suporte fixo apenas nos furos externos do disco com restrições aos deslocamentos nas direções x, y, z, deixando o restante do disco em condição livre (Vide Fig. 5 b).

Na sequência, para análise harmônica foi aplicado o momento angular de 540 N-m na superfície perimetral do disco, com objetivo de impor a condição de movimento angular.

Assim que todas as condições de contorno foram impostas na geometria do disco, realizaram-se as simulações de análise modal para se determinar os modos de vibração e as frequências naturais referentes a cada modo de vibração, o valor da análise modal utilizados foi do 1º modo de vibração até o 5º modo de vibração e suas frequências naturais. Os valores de frequências naturais e de deformação do disco estão apresentados na Tabela 4, esses valores de frequência natural e deformação foram obtidos utilizando o valor médio do módulo de elasticidade de 215 Mpa, considerando o aço 1006, vide Figura 6.

TABELA 4. Máxima deformação para cada modo de vibração e sua frequência.

| AÇO 1006 | | |
|---|---|---|
| Modo de Vibração | Frequência (Hz) | Máxima Deformação (mm) |
| 1º | 35,803 | 44,236 |
| 2º | 65,568 | 44,667 |
| 3º | 65,668 | 44,698 |
| 4º | 108,36 | 39,153 |
| 5º | 108,96 | 39,149 |

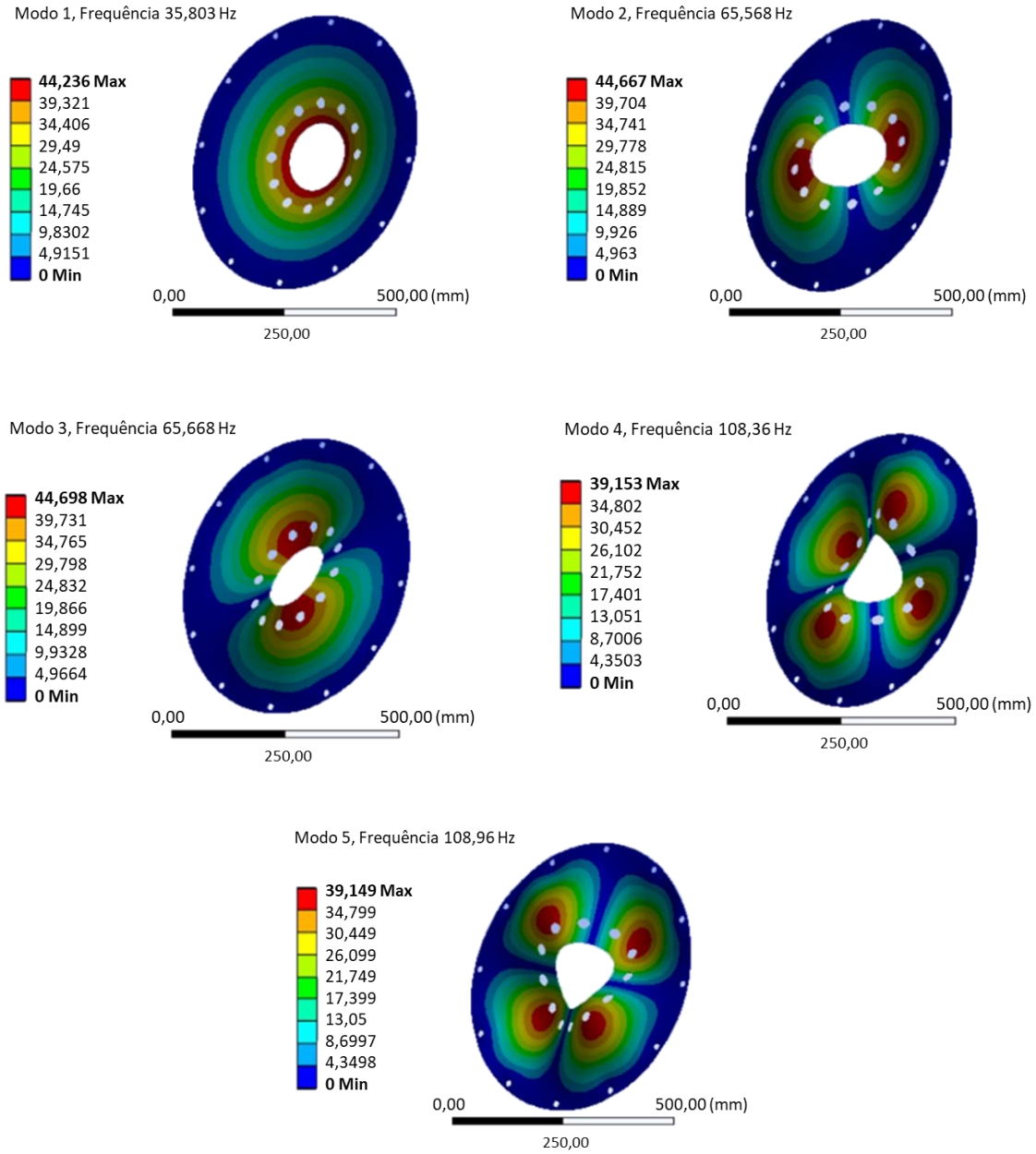



FIGURA 6. Deformação do disco para 5 primeiros modos de vibração. Fonte: os autores (2021).

Foram obtidos novos resultados através das variações do modulo de elasticidade como objetivo de determinar as frequência e deformações para o intervalo de ± 5% até ± 30%, como mostram as Tabelas 5 e 6.

**Tabela 5.** Análise modal para variações positivas do modulo de elasticidade

| Modo | 5% | | 10% | | 15% | | 20% | | 30% | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Freq. (Hz) | Máx. Def. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Def. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Def. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Def. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Def. (mm) |
| 1º | 36,626 | 44,23 | 33,759 | 44,23 | 38,37 | 44,23 | 39,22 | 44,23 | 40,85 | 44,23 |
| 2º | 67,075 | 44,66 | 68,841 | 44,66 | 70,27 | 44,66 | 71,826 | 44,66 | 74,82 | 44,66 |
| 3º | 67,178 | 44,69 | 68,946 | 44,69 | 70,38 | 44,69 | 71,936 | 44,69 | 74,94 | 44,69 |
| 4º | 110,85 | 39,15 | 113,77 | 39,15 | 116,15 | 39,15 | 118,71 | 39,15 | 123,66 | 39,15 |
| 5º | 111,47 | 39,14 | 114,41 | 39,14 | 116,79 | 39,14 | 119,36 | 39,14 | 124,35 | 39,14 |

**Tabela 6.** Análise modal para variações negativas do modulo de elasticidade

| Modo | -5% | | -10% | | -15% | | -20% | | -30% | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Freq. (Hz) | Máx. Defor. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Defor. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Defor. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Defor. (mm) | Freq. (Hz) | Máx. Defor. (mm) |
| 1º | 34,875 | 44,23 | 337,59 | 44,236 | 33,031 | 44,236 | 32,023 | 44,236 | 30,00 | 44,23 |
| 2º | 63,868 | 44,66 | 68,841 | 44,667 | 60,492 | 44,667 | 58,645 | 44,667 | 54,94 | 44,66 |
| 3º | 63,966 | 44,69 | 68,946 | 44,698 | 60,584 | 44,698 | 58,735 | 44,698 | 55,03 | 44,69 |
| 4º | 105,55 | 39,15 | 113,77 | 39,153 | 99,974 | 39,153 | 96,922 | 39,153 | 90,81 | 39,15 |
| 5º | 106,14 | 39,14 | 114,41 | 39,149 | 100,53 | 39,149 | 97,459 | 39,149 | 91,31 | 39,14 |

*Freq. = Frequência; Máx. Defor. = Máxima deformação

## 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE HARMÔNICA

A análise harmônica é realizada com o objetivo de avaliar os modos de vibração que mais contribuem para a resposta dinâmica estrutural. Onde as maiores amplitudes representam as forças que correspondem às frequências naturais da estrutura.

Partindo desse princípio, a simulação passa a utilizar a metodologia de análise de harmônicos, considerando um intervalo de frequência de 0 até 200 Hz, com intervalo de leitura de 1 Hz. Sendo assim, 200 intervalos de frequência foram escolhidos para a aplicação da força harmônica nas coordenadas e geometria do disco de acoplamento. A aplicação do momento

harmônico foi de 504 N-m na coordenada z do disco de acoplamento, sendo momento total para os 5 discos de acoplamento de 3024 N-m.

Na Figura 7 apresenta-se o valor médio da resposta a excitação harmônica do material aço 1006. Nas Figuras de 8 a 13 observam-se as respostas harmônicas em frequência (FRF), os picos de amplitude e as frequências de ante ressonância para o material aço 1006.

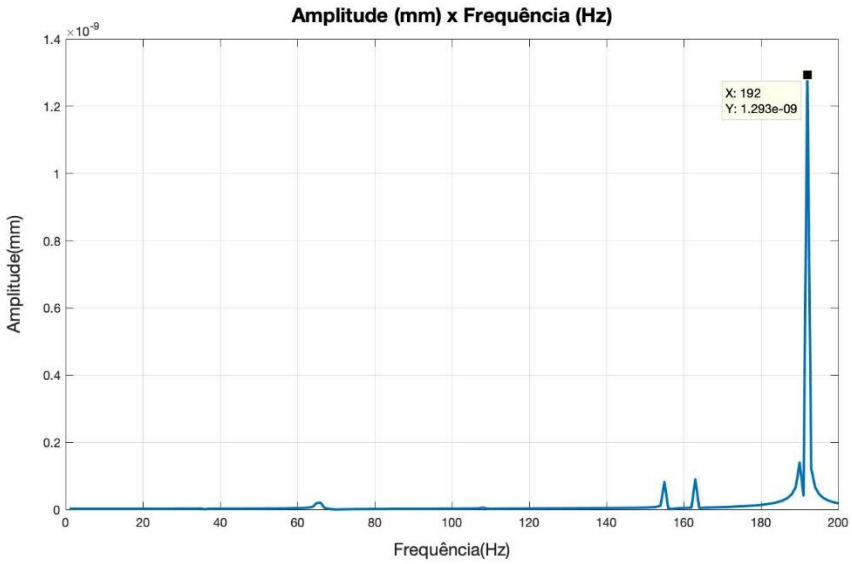
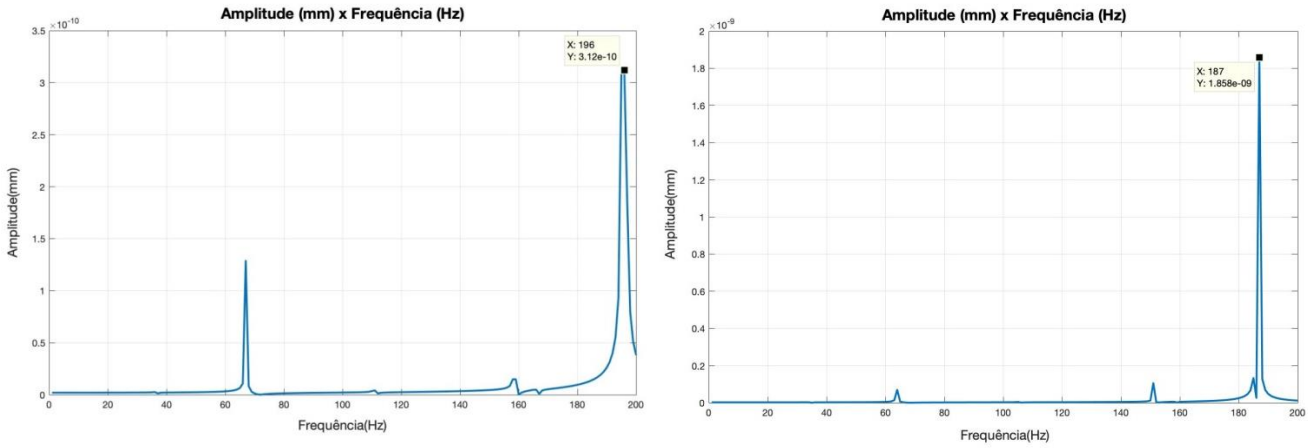
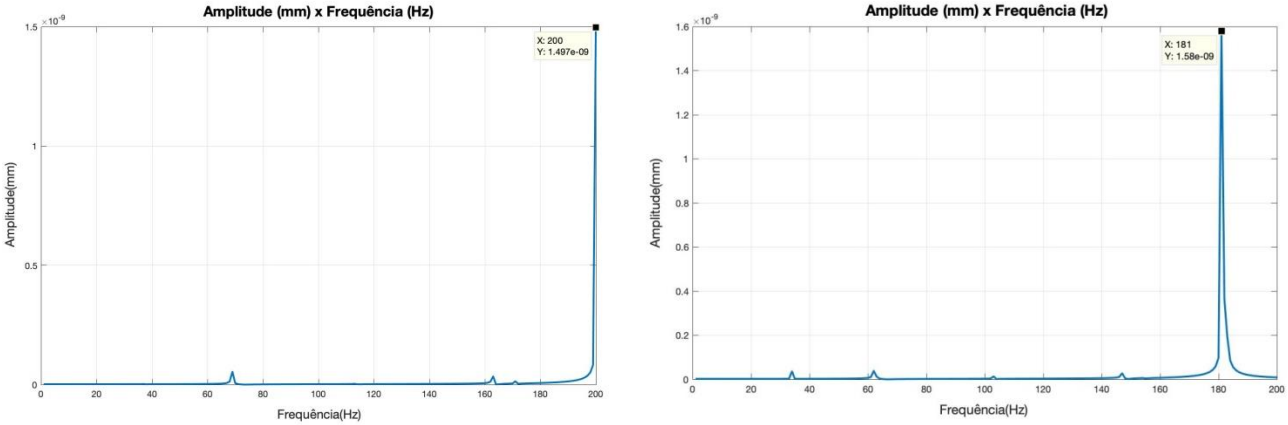



FIGURA 7. Resposta à excitação harmônica material aço 1006 valor médio. Fonte: os autores (2021).



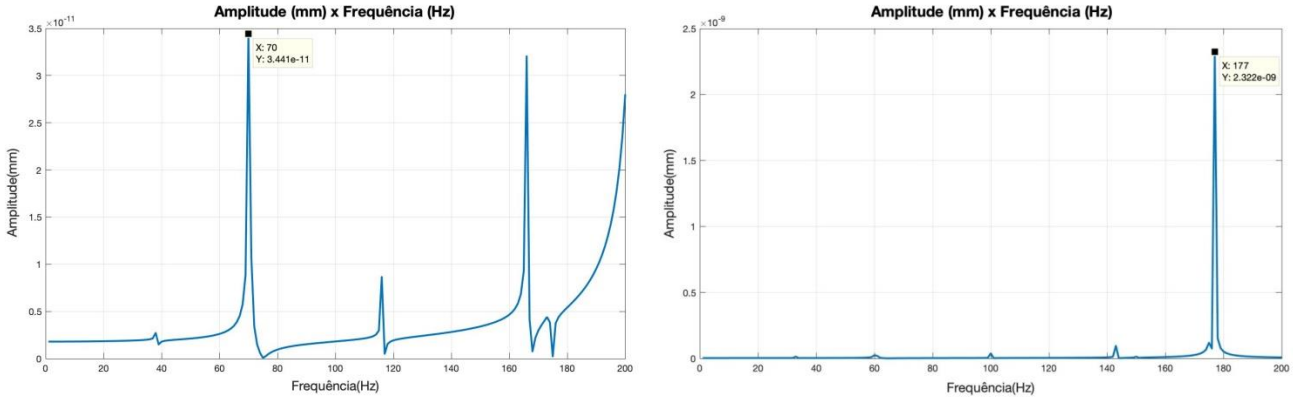

(a) (b)

FIGURA 8. Resposta à excitação harmônica material aço 1006; (a) valor +5%; (b) valor -5%. Fonte: os autores (2021).



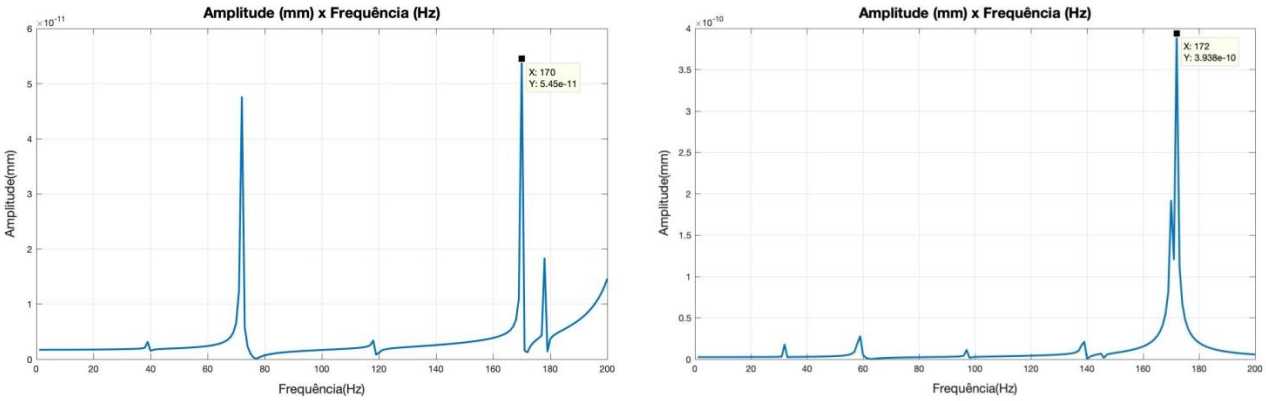

(a) (b)

FIGURA 9. Resposta à excitação harmônica material aço 1006; (a) valor +10%; (b) valor -10%. Fonte: os autores (2021).



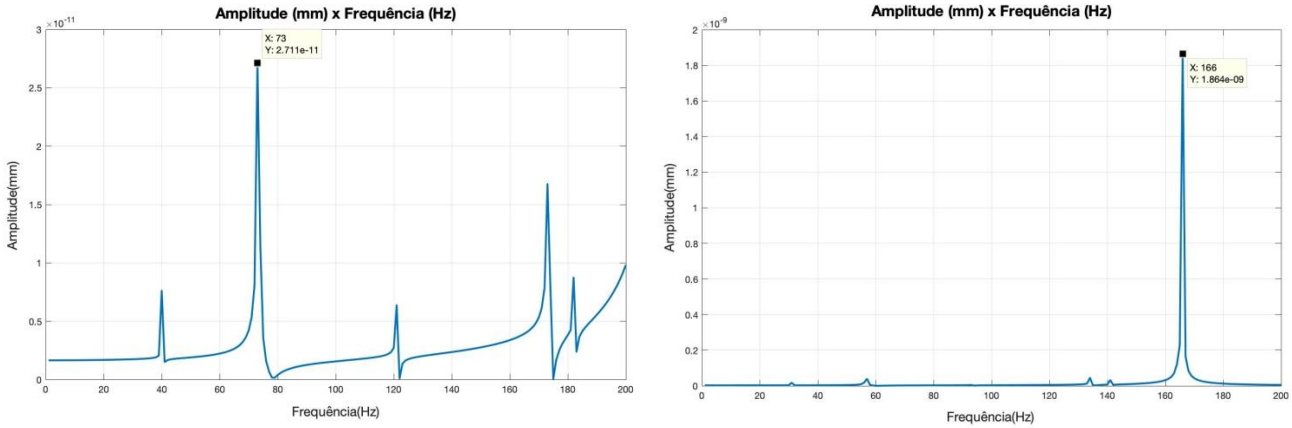

(a) (b)

FIGURA 10. Resposta à excitação harmônica material aço 1006; (a) valor +15%; (b) valor -15%. Fonte: os autores (2021).



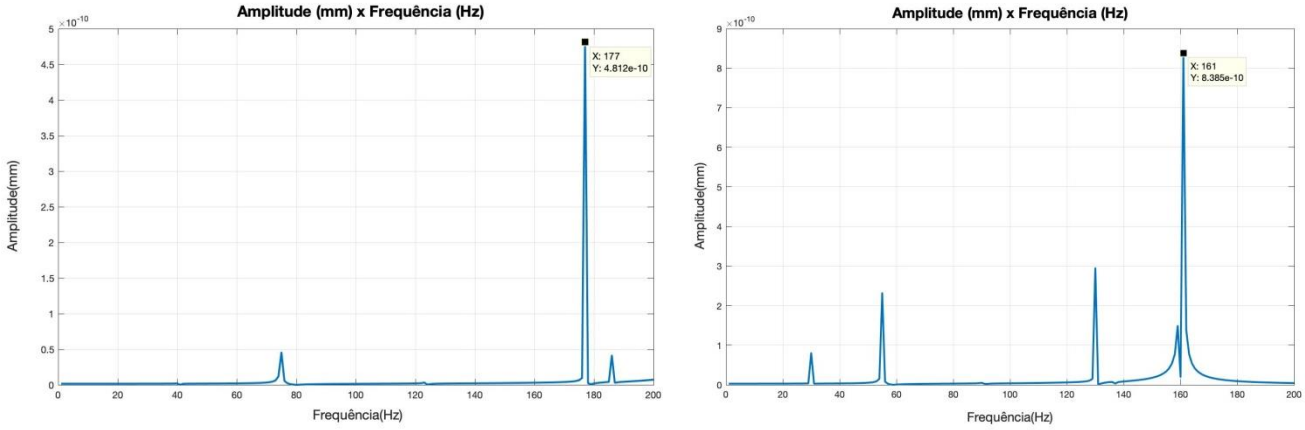

(a) (b)

FIGURA 11. Resposta à excitação harmônica material aço 1006; (a) valor +20%; (b) valor -20%. Fonte: os autores (2021).




(a) (b)

**FIGURA 12.** Resposta a excitação harmônica material aço 1006; (a) valor +25%; (b) valor -25%.
Fonte: os autores (2021).




(a) (b)

**FIGURA 13.** Resposta à excitação harmônica material aço 1006; (a) valor +30%; (b) valor -30%.
Fonte: os autores (2021).

Nas simulações realizadas para análise modal dos discos utilizando o valor médio para o modo de elasticidade de 215 (MPa) obteve-se as frequências naturais e modos de flexão, considerando apenas um disco de acoplamento com o volante do motor, onde a deformação máxima foi de 44,236 mm para a frequência de 35,803.

Para a simulação realizada com a variação de +5%, +10%, +15%, +20%, +25% e +30% em cima do valor médio, observar-se uma variação considerada alta no valor das frequências naturais, já para os valores de deformação não ocorre alterações em seus deslocamentos.

Após a variação do valor médio do módulo de elasticidade para valores mais elevados observam-se valores de frequências iguais isso acontece porque ocorre uma mudança de direção

no modo de vibração, o mesmo ocorre quando se aplica o decréscimo -5%, -10%, -15%, -20%, -25% e -30%.

Na simulação realizada com o decréscimo de -5%, -10%, -15%, -20%, -25% e -30 em cima do valor médio, observar-se uma variação considerada alta no valor de redução das frequências naturais, já para os valores de deformação não ocorrem alterações em seus deslocamentos. Com isso pode-se dizer que ao alterar o valor do módulo de elasticidade para cima ou para baixo ele irá alterar os valores de frequência natural do sistema.

Na Figura 7 observa-se o valor de pico máximo da amplitude que é de 1,293 x$10^{-9}$ mm referente à sua frequência de excitação com valor de 192 Hz. Para as Figuras de 8 a 13 é possível observar os picos de amplitudes e suas frequências de excitação em cima do valor médio do módulo de elasticidade acrescido de ± 5% até ± 30%. Com a excitação harmônica do material aço 1006, para valores percentuais de ± 5% até ± 30% em cima do valor médio do módulo de elasticidade onde o valor do módulo de elasticidade está diretamente ligado ao ensaio das propriedades estruturais do material, possibilitou uma análise de comparação entre a tensão vs. deformação no disco volante.

Por meios dos valores acrescidos no valor médio do módulo de elasticidade, observa-se que quanto maior o valor do módulo de elasticidade maior será o valor do pico de amplitude, assim sendo, quanto maior o valor do pico de amplitude menos o material irá se deformar.

Quando ocorre o decréscimo em cima do valor médio do módulo de elasticidade, os valores de amplitude dos picos de frequência decaem e com isso aumento os valores de deformação. Portanto, pode-se dizer que quanto maior o valor do módulo de elasticidade menor será a sua deformação, quando for menor o valor do módulo de elasticidade maior será a sua deformação.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nas análises modais e análise harmônica conclui-se assim que as simulações apresentaram resultados coerentes com as analises de vibração do acoplamento flexível.

No entanto, os resultados podem mudar conforme uma possível mudança na escolha do material estrutural e do módulo de elasticidade, para uma representação mais confiável do disco de acoplamento, para isso novas análises poderá ser realizada, como a análise estática para determinar as possíveis tensões admissíveis no disco de acoplamento, e uma nova análise dinâmica para determinar as tensões máximas de ruptura no disco de acoplamento. Simulações com variação na quantidade de discos em conjunto, podendo ser de 2, 3, 4, 5 e 6 discos que é sua capacidade máxima, também poderão ser realizadas em trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. T. Vibrações mecânicas para engenheiros. 2. ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1990.

BALACHANDRAN, BALAKUMAR; MAGRAB, EDWARD B. Vibrações mecânicas. Tradução da 2. ed., Austrália: Cengage Learning, 2009.

BATHE, J.; WILSON, E. L. Numerical methods in finite elements analysis. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1976. 528 p.

CHUVAS, T. C. Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

GUILLAUME, P. Modal Analysis. Encyclopedia of Life Support Systems, Oxford (UK), 2002.

JUNIOR, J. S.; FRANÇA, L. N. F. Introdução às vibrações mecânicas. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

LUNDKVIST, André. Modal analysis project. Luleâ University of Technology. Disponível em: < http://www.student.ltu.se/~nadlun-5/pdfs/l7005a_report_main.pdf>. Acesso em: 04 dezembro 2014.

SILVA, SAMUEL. Vibrações mecânicas. Academia.edu. Disponível em: <http://www.academia.edu/9088620/Universidade_Estadual_do_Oeste_do_Paran%C3%A1_Vibra%C3%A7%C3%B5es_Mec%C3%A2nicas>. Acesso em: 04 dezembro 2014.

SOEIRO, N. S. Análise modal experimental. Universidade Federal do Pará (2014).

SCHWARZ, BRIAN J.; RICHARDSON, MARK H. Experimental Modal Analysis. P*roceedings in: CSI Reliability Week*, Jamestown, Califórnia, 1999.

RAO, SINGIRESU. Vibrações mecânicas. 4. ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

ZIENKIEWICZ, O. C. The finite element method. 3. ed. London: McGraw-Hill, 1985.