



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



RAPHAEL NOGUEIRA DE OLIVEIRA

**BALANCEAMENTO DINÂMICO EM ELEMENTOS DE
MÁQUINAS ROTATIVOS POR MEIO DE MICRO ESFERAS**

OURO PRETO - MG
2024

RAPHAEL NOGUEIRA DE OLIVEIRA

raphael.nogueira@aluno.ufop.edu.br

**BALANCEAMENTO DINÂMICO EM ELEMENTOS DE MÁQUINAS
ROTATIVOS POR MEIO DE MICRO ESFERAS DE VIDRO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Minas de Ouro Preto da UFOP como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli

Professor coorientador: Prof. Dr. Diogo Antônio de Souza

**OURO PRETO – MG
2024**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48b Oliveira, Raphael Nogueira de.
Balanceamento dinâmico em elementos de máquinas rotativos por meio de micro esferas de vidro. [manuscrito] / Raphael Nogueira de Oliveira. - 2024.
91 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Guimarães.

Coorientador: Prof. Dr. Diogo Sousa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Mecânica - Vibração. 2. Balanceamento de máquinas. 3. Veículos - Rodas. 4. Veículos - Pneus. I. Guimarães, Gustavo. II. Sousa, Diogo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Raphael Nogueira de Oliveira

Balanceamento dinâmico em elementos de máquinas rotativos por meio de micro esferas de vidro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 10 de outubro de 2024

Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Me. João Carlos Vilela de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Paulo Henrique Vieira Magalhães - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/02/2025



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/08/2025, às 20:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0956097** e o código CRC **066778BD**.

A DEUS dedico mais esta etapa vencida.

A MEUS PAIS, pelo incentivo aos estudos e fundamentação de bons valores.

A ESCOLA DE MINAS DE OURO PRETO, pelos seus 148 anos de conhecimentos a mim oferecidos.

A REPÚBLICA NECROTÉRIO e seus 65 anos de história por ter me oferecido um lar.

AGRADECIMENTO

Aos Professores orientador Gustavo Paulinelli Guimarães e Coorientador Diogo Antônio de Sousa, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Ao Professor da disciplina de trabalho de conclusão de curso, Washington Luís Vieira da Silva, por acompanhar a construção deste trabalho desde sua concepção ao fim.

Aos meus parceiros de estudo, Lucas Henrique Silva de Alcântara (Luquinha), Luís Eduardo de Magella Mattos Tavares (Led), Thiago dos Santos Silva (Tijolo), pela ajuda na realização dos experimentos e na elaboração da compilação das amostras e dados gerados nesse estudo.

Aos meus mestres dos cursos de Engenharia Mecânica, por suas importantes contribuições para o aprimoramento do meu conhecimento.

A turma do mestrado (PROFICAM) do Instituto Tecnológico Vale de Ouro Preto, pelo apoio com a automação e instrumentação envolvidas nesse experimento.

Aos responsáveis pelo Laboratório de acústica, vibrações e sistemas inteligentes (L'AViSI) da Escola de Minas de Ouro Preto, por me fornecerem a estrutura necessária para a realização desse estudo.

“Se estas atravessando um inferno, continue atravessando”.

Winston Churchill

RESUMO

O presente trabalho investiga a viabilidade do balanceamento de um sistema mecânico rotativo, naturalmente desbalanceado, constituído por um garfo que sustenta um conjunto roda-pneu. A proposta baseia-se na introdução de microesferas de vidro, comercialmente disponíveis, no interior do pneu, com o intuito de compensar o desbalanceamento inerente ao sistema por meio da redistribuição dessas esferas durante a rotação do conjunto. A escassez de estudos na literatura técnica que comprovem a eficácia dessa abordagem justifica a realização da pesquisa. Além de demonstrar uma alternativa ao balanceamento convencional, tal processo visa contribuir para a redução de falhas e o desgaste dos componentes rotativos, bem como promover melhores condições ergonômicas. Considerando que vibrações excessivas influenciam negativamente no conforto, estresse e fadiga de agentes que interagem rotineiramente com tais equipamentos, dessa forma o impacto na saúde ocupacional torna-se um fator relevante. A metodologia adotada envolveu medições de vibrações no eixo de sustentação da roda, utilizando acelerômetros e medições de força através de células de carga instaladas nas extremidades do eixo. Os resultados indicaram que o balanceamento utilizando microesferas de vidro não foi eficaz, registrando vibrações no sistema roda pneu significativamente superiores às observadas no balanceamento tradicional, realizado com contrapesos de chumbo fixados à roda.

Palavras-chave: Vibrações. Balanceamento. Roda. Pneu. Elementos de máquinas rotativas.

ABSTRACT

This study investigates the feasibility of balancing a naturally unbalanced rotary mechanical system, consisting of a fork supporting a wheel-tire assembly. The proposed approach involves inserting commercially available glass microspheres into the tire in order to counteract the inherent imbalance of the system through dynamic redistribution of the spheres during rotation. The lack of technical literature validating the effectiveness of this method justifies the execution of this research. Beyond presenting an alternative to conventional balancing techniques, the process aims to reduce failures and wear in rotating machine components, as well as improve ergonomic conditions. Excessive vibrations negatively affect the comfort, stress levels, and fatigue of individuals who routinely interact with such equipment, making occupational health impacts a relevant factor. The methodology employed included vibration measurements on the wheel support shaft using accelerometers, as well as force measurements using load cells installed at both ends of the shaft. The results indicated that the balance achieved using glass microspheres was not effective, as the vibration levels recorded in the wheel-tire system were significantly higher compared to those obtained with traditional balancing using lead counterweights attached to the wheel.

Keywords: Vibrations. Balancing. Wheel. Tire. Rotating machine elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vetores velocidade e aceleração de uma partícula em movimento circular uniforme	5
Figura 2: Vetores velocidade e aceleração de uma partícula em movimento circular uniforme	6
Figura 3: Loop realizado por uma moto em uma circunferência vertical.....	7
Figura 4: Um <i>Compact Disc</i> girando sobre um eixo fixo que passa pelo ponto “O” perpendicular ao plano da figura.....	8
Figura 5: O deslocamento angular de um CD é o ângulo $\Delta\theta$ varrido por uma linha radial enquanto o disco gira em torno do seu eixo de rotação.....	9
Figura 6: Movimento de rolagem de uma roda como a combinação entre rotação e translação.	11
Figura 7: Fotografia de uma roda de bicicleta em movimento rotacional e translacional	11
Figura 8: Vetores mostrando a velocidade instantânea da roda em diversas posições	12
Figura 9: Sistema com massa desbalanceada	13
Figura 10: Diagrama de corpo livre do sistema.....	13
Figura 11: Balanceamento de um disco em um plano.....	16
Figura 12: Forças atuantes nos mancais de rolamento	17
Figura 13: Balanceamento em um plano utilizando analisador de vibração	17
Figura 14(a), (b), (c), (d): Utilização de marcas de fase	18
Figura 15: Desbalanceamento devido ao peso experimental W	19
Figura 16: Fluxograma do procedimento metodológico	24
Figura 17 (a): Vista em perfil da montagem experimental	25
Figura 18: Micro esferas de vidro.....	26
Figura 19: Célula de carga sensor.....	27
Figura 20: Motor de transmissão	28
Figura 21: Roda de bicicleta	29
Figura 22: Suporte dos mancais de sustentação da roda	30

Figura 23: Placa receptora se sinal	32
Figura 24: Tacômetro digital	33
Figura 25: Balança digital	34
Figura 26: Acelerômetro utilizado nas medições de aceleração	35
Figura 27: Montagem do experimento	36
Figura 28: roda montada com pneu verdadeiro de borracha	37
Figura 29: Célula de carga MK Controle.....	38
Figura 30: Instalação dos acelerômetros	38
Figura 31: Tacômetro digital para medição através de infravermelho da rotação da roda.....	39
Figura 32: Pontos de parada do chumbo de balanceamento.....	40
Figura 33: Resultados obtidos através dos valore de RMS dos acelerômetros 1 e 2.....	46
Figura 34A:Gráfico comparativo entre três diferentes rotações e suas frequências naturais.	47
Figura 35A: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.	49
Figura 36A: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação.....	51
Figura 37: Gráfico comparativo entre uma distribuição normal e os valores obtidos	52
Figura 38: Comparativo entre seis diferentes condições de balanceamento obtidos através da célula de carga.....	53
Figura 39: Resultados obtidos através dos valores em RMS do comparativo entre seis condições nos acelerômetros 1 e 2.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Variáveis e indicadores
Tabela 2	Obtenção do RMS das acelerações em cada acelerômetro.
Tabela 3	Compilação dos valores obtidos através do RMS
Tabela 4	Valores de força obtidos através da célula de carga.
Tabela 5	Obtenção do RMS das acelerações em cada acelerômetro.
Tabela 6	Compilação dos dados de aceleração em RMS

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação da aceleração de uma partícula em movimento circular	(1)
Equação do período de uma partícula em movimento circular	(2)
Equação da força centrípeta	(3)
Equação de um ângulo em radianos	(4)
Equação em radianos de uma circunferência completa	(5)
Equação da equivalência de um radiano em graus	(6)
Equação da velocidade angular média	(7)
Equação da aceleração angular média	(8)
Equação da velocidade tangencial	(9)
Equação da aceleração tangencial	(10)
Equação da aceleração centrípeta dada em radianos	(11)
Equação governante do desequilíbrio em relação a direção vertical (I)	(12)
Equação governante do desequilíbrio em relação a direção vertical (II)	(13)
Equação governante do desequilíbrio em relação a direção vertical (III)	(14)
Equação governante do desequilíbrio em relação a direção vertical (IV)	(15)
Equação da magnitude da força desbalanceadora	(16)
Equação do deslocamento estático de mola	(17)
Equação da soma das forças presentes em um sistema rotativo igual a zero	(18)
Equação da força exercida sobre um mancal	(19)
Equação da quantidade de massa balanceadora	(20)
Equação do ângulo de posição da massa balanceadora	(21)
Frequência fundamental (Hz)	(22)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos	3
1.4	Estrutura do Trabalho.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Movimento circular	5
2.2	Vibrações mecânicas.....	12
2.3	Balaceamento	15
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Tipo de pesquisa.....	21
3.1.1	Quanto a forma de abordagem	21
3.1.2	Aos objetivos da pesquisa	22
3.1.3	Aos procedimentos técnicos.....	22
3.2	Materiais e métodos	23
3.3	Variáveis e Indicadores	30
3.4	Instrumento de Coletas de Dados.....	32
3.5	Tabulação dos dados	35
3.6	Montagem do ensaio	35
3.7	Da disposição dos instrumentos de medição	37
3.8	Das medições.....	39
3.8.1	Procedimento das medições	41
3.8.2	Medições com pneu de borracha verdadeiro	41
3.8.3	Medições com pneu fictício (mangueira de borracha).....	42
4	RESULTADOS E DISCUÇÕES.....	45
4.1	Resultados com pneu de borracha verdadeiro	45
4.1.1	Análise das amostras de aceleração em RMS obtidas através dos acelerômetros no pneu de borracha verdadeiro.	45
4.1.2	Análise das amostras através da transformada de Fourier	47

4.1.3	Análise das amostras obtidas através da célula de carga.....	52
4.2	Resultados com o pneu (mangueira).....	53
4.2.1	Análise das amostras através da obtenção do RMS com pneu (mangueira).....	53
4.3	Considerações Finais	55
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	56
5.1	Conclusão.....	56
5.2	Recomendações.....	56
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	58
	ANEXO A	60
	ANEXO B	68
	ANEXO C	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Grande parte do cotidiano das pessoas envolve vibrações, casos como a audição, vibração dos tímpanos, visão (vibração da luz), locomoção, (oscilação das pernas), fala (vibração das cordas vocais) através da oscilação da laringe (RAO, 2008).

As vibrações tomaram seu primeiro despertar na antiguidade através dos instrumentos musicais, estes estavam presentes no cotidiano popular de uma forma muito íntima. Apesar desses fatores, as vibrações e seus estudos não poderiam ser considerados como uma ciência. Com o passar dos tempos instrumentos para os estudos das vibrações foram desenvolvidos como o monocórdio de Pitágoras, que tratava das relações das tensões nas cordas e suas harmônicas (RAO, 2008).

Assim, para Rao (2008, p.6), “qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação”.

A compreensão dos fenômenos vibratórios é de suma importância na indústria, no conforto e na saúde humana, visto que o desgaste prematuro de elementos de máquinas é severamente afetado quando estão sujeitas a presença de vibrações, ocorrendo da mesma forma com o corpo humano podendo chegar a fadiga gerando assim graves patologias (SOEIRO, 2011), (SOTELO, 2006).

Atualmente os estudos sobre vibrações envolvem a área da engenharia e suas aplicações em projetos de motores, fundações, sistemas rotativos como turbinas, estruturas e a forma como as vibrações as afetam no sentido de crescimento de falhas através do desbalanceamento, gerando fadiga nos equipamentos, desgaste em rolamentos, eixos, mancais, engrenagens e suas fixações. Também servindo como exemplo, acabamentos de peças usinadas são severamente afetados por vibrações em suas máquinas operatrizes (RAO, 2008).

Os problemas de falhas já citadas e o desconforto daquele que utiliza um equipamento ou dispositivo roto translacional desbalanceado é também uma preocupação inerente ao ramo do estudo das vibrações diretamente ligado a saúde ocupacional, visto que o incômodo ergonômico causado por um sistema desbalanceado. Esse incômodo pode ser amplificado quando a frequência natural do equipamento é coincidente com a frequência natural de partes do corpo do usuário ocorrendo a chamada ressonância, trazendo malefícios relacionados à

saúde, segurança e conseqüentemente a imagem comercial/econômica do equipamento em questão (RAO, 2008; SOEIRO, 2011).

A finalidade do estudo é eliminar ou diminuir os desgastes e conseqüentemente aumentar a vida útil do equipamento e o conforto do usuário em contato com um sistema rotativo, composto por roda pneu balanceamento através da introdução de micro esferas no interior deste pneu.

Baseado no contexto tem-se a seguinte problemática:

É possível balancear um conjunto roda pneu através da introdução no interior do pneu de micro esferas disponíveis comercialmente ?

1.2 Justificativa

Observa-se que o modo produtivo tradicional de rodas e pneus não possibilita a fabricação de um sistema homogêneo, equilibrado e livre de imperfeições, assim como a montagem desse conjunto roda, pneu também leva a algum desequilíbrio, gerando ao desbalanceamento do sistema, afetando diretamente o conforto e a segurança de quem os utiliza (NORTON 2011).

Visando o conforto e segurança do usuário de um sistema mecânico rotativo segundo Soeiro *et al* (2011, p.53) há necessidade do estudo do balanceamento desse sistema, pois:

Em muitos sistemas de engenharia, o ser humano atua como parte integrante do mesmo. A transmissão de vibração para o ser humano resulta em desconforto e perda de eficiência, podendo constituir um risco em potencial para os trabalhadores, uma vez que as vibrações podem desencadear perturbações neurológicas ou musculares, vasculares e lesões osteoarticulares, no caso das vibrações transmitidas ao sistema mão-braço e patologias na região lombar e lesões da coluna vertebral, para o caso das vibrações transmitidas a todo o organismo.

Conforme Soeiro (2011), um sistema mecânico vibracional pode interagir com o ser humano o afetando de duas formas e são elas: A primeira seria a vibração de corpo inteiro que afeta os órgãos internos, como por exemplo, pernas, costas, tórax e abdômen, que são vibrações de baixa frequência e derivam de interações do indivíduo geralmente com equipamentos móveis como, carros, caminhões, tratores, empilhadeiras e trens que é o caso do interesse deste estudo. A segunda forma de interação são as vibrações de extremidades, estas se apresentam com vibrações de maiores frequências e afetam diretamente membros como

mãos e braços derivadas de equipamentos rotativos manuais como, esmerilhadeiras, furadeiras e martelos e esse tipo de vibração não é objetivo desse estudo (SOEIRO, 2011).

A Norma ISO 2631-1 (1997) estabelece os parâmetros máximos para vibrações de corpo inteiro considerando fadiga, enjoos, cansaço, desconforto até que estes se tornem um agravante para a saúde ocupacional do ser humano que interage com um determinado equipamento rotativo vibratório.

Assim, a Norma ISO 2631-1 (1997) destaca os seguintes benefícios;

- Melhorar o conforto do ser humano ao se utilizar um sistema rotativo desbalanceado através do balanceamento por micro esferas;
- Aumentar os níveis de segurança de um equipamento que contenha um sistema rotativo roda, pneu;
- Analisar a possibilidade de se balancear outros sistemas rotativos como eixos, acoplamentos e rotores utilizando micro esferas inseridos em dispositivos presos a suas partes externas;
- Aumentar a vida útil e a confiabilidade de um sistema rotativo roda, pneu evitando e ou reduzindo as falhas desse conjunto e do conjunto que os compõe como um todo, veículo, roda.

Estes são os principais pontos tratados nesta norma com relevância a este estudo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Balancear um sistema rotativo desbalanceado composto por roda e pneu, eliminando suas vibrações, através da inserção de micro esferas no interior do pneu.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver um estudo teórico sobre: movimento circular de uma partícula; vibrações mecânicas; balanceamento;

- Elaborar um procedimento metodológico para estudar uma forma de se balancear um sistema rotativo roda pneu através da inserção de micro esferas dentro deste pneu;
- Descobrir os fundamentos do balanceamento de um sistema roda pneu através da introdução de micro esferas no interior deste pneu;
- Verificar se o uso de micro esferas no interior de um sistema roda pneu balanceará o sistema;
- Analisar a massa necessária de micro esferas para se balancear um determinado sistema roda pneu;
- Realizar um comparativo entre um sistema rotativo roda pneu balanceado através de micro esferas e um sistema rotativo roda pneu balanceado através da metodologia tradicional que consiste no acréscimo e ou retirada de massores de chumbo instalado na roda;
- Contribuir com a escassa literatura a respeito do balanceamento de sistemas rotativos através de micro esferas.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seu objetivo geral e específico.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias à respeito da vibração e balanceamento de sistemas mecânicos. Também são relatados os diferentes tipos e formas de balanceamento, relacionando-os com as vantagens e desvantagens existentes em cada um.

No terceiro capítulo é demonstrada a metodologia empregada listando e especificando os componentes utilizados no experimento para a realização do estudo.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos experimentos, embasados por tabelas e gráficos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Movimento circular

A determinação do comportamento de uma partícula é dada da seguinte forma:

Segundo Halliday (2022), uma partícula que se movimenta em uma trajetória circular com um raio definido e velocidade constante apresenta-se em um movimento circular uniforme e se sujeita a uma aceleração (a), onde (v) é a velocidade e (r) o raio da circunferência dada pela equação:

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

Conforme a equação 1, apesar da velocidade se manter constante a partícula estará acelerada, pois a direção da velocidade muda constantemente a cada ponto da circunferência.

O tempo para essa partícula completar uma volta sobre essa circunferência é conhecido como período, (T) dado pela equação:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad (2)$$

Essa aceleração é denominada como (**aceleração centrípeta**) e aponta para o centro da circunferência, assim como a velocidade apontará para fora de forma tangencial à circunferência, estas posições são representadas pela figura 1 (HALLIDAY 2022).

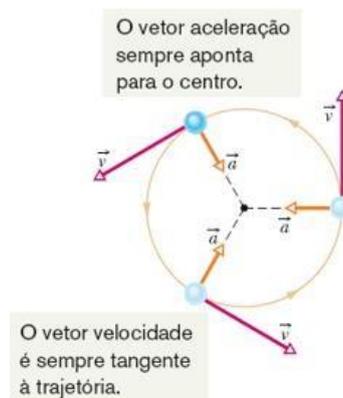


Figura 1: Vetores velocidade e aceleração de uma partícula em movimento circular uniforme
Fonte: Halliday, 2022.

Observa-se na figura 1 a mudança de posição do vetor velocidade no decorrer da trajetória demonstrando que existe uma aceleração. Essa aceleração é denominada aceleração centrípeta.

Segundo Cutnell (2016), para que um objeto acelere é necessária uma força resultante, fenômeno explicado pela segunda lei de Newton, portanto para que haja uma aceleração no movimento circular que é a aceleração centrípeta, deve haver uma força para que isso aconteça, essa força é chamada de força centrípeta (F_c) onde (m) é a massa da partícula dada pela seguinte equação:

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (3)$$

Assim como a aceleração centrípeta, a força centrífuga também aponta para o centro da circunferência mudando de direção no decorrer do movimento.

A figura 2 representa a força que um aeromodelo em movimento faz no fio que o liga ao centro e o mantém na trajetória circular.

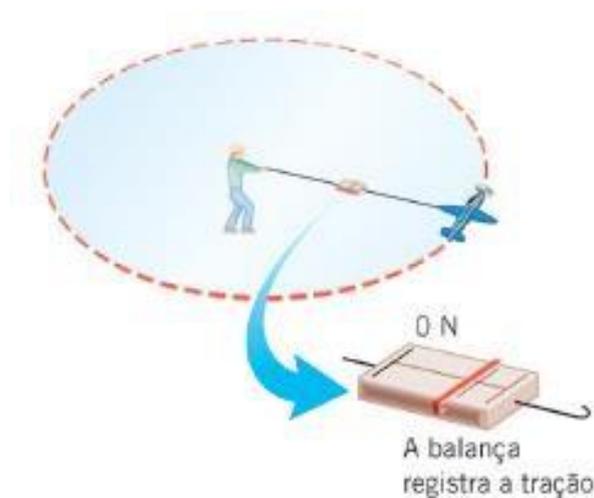
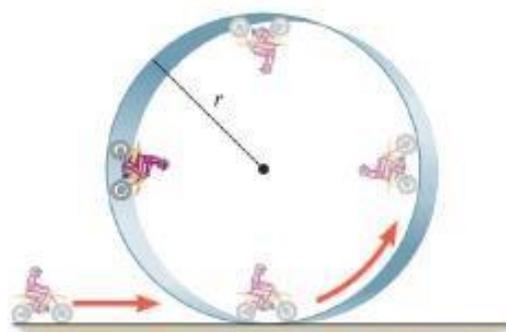


Figura 2: Vetores velocidade e aceleração de uma partícula em movimento circular uniforme
Fonte: Halliday, 2022.

O cabo demonstrado na figura 2 está sob o efeito das forças radiais que mantém o aeromodelo em movimento circular, que neste caso é a força de tração no fio, porém existem casos onde a força centrípeta são mais difíceis de serem identificadas como as forças

gravitacionais que mantêm em órbita satélites, força normal em pistas de curvas com superelevação, força de atrito entre os pneus de um carro e o solo ao se fazer uma curva, ou um somatório de todas elas.

Para reforçar a ideia de que a força centrípeta é o resultado de uma resultante de forças observa-se a análise feita por Cutnell (2016) sobre o movimento circular vertical, exemplificado por uma pista de moto circular na posição vertical, onde motociclistas fazem manobras somente possíveis pelas resultantes de forças que geram a força centrípeta. A figura 3 demonstra as forças atuantes na manobra.



(a)

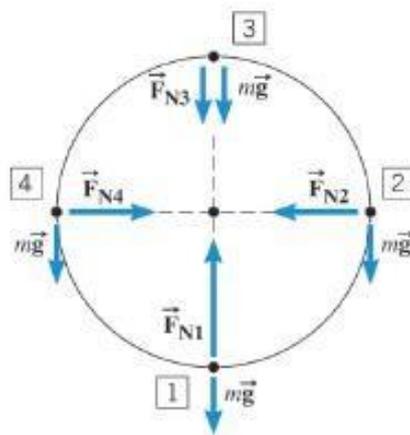


Figura 3: Loop realizado por uma moto em uma circunferência vertical
Fonte: Cutnell, 2016.

Na figura 3, as forças normais e peso atuantes resultando na força centrípeta ficam claramente exemplificadas nos quatro pontos da circunferência.

Um corpo alongado como, por exemplo, uma roda ao girar não pode ser modelada como uma partícula, pois segundo Serway (2014) existem nesse corpo partes com velocidades e posições diferentes entre si, então este corpo será tratado como um conjunto de partículas.

Porém para uma simplificação de análise, este corpo é tratado hipoteticamente como corpo rígido indeformável, visto que um corpo indeformável não existe.

Em posse desses conhecimentos, pode-se agora introduzir os conceitos de posição, velocidade e aceleração angular. Para isso é tomado o exemplo de um CD girando em seu eixo como demonstrado na figura 4.

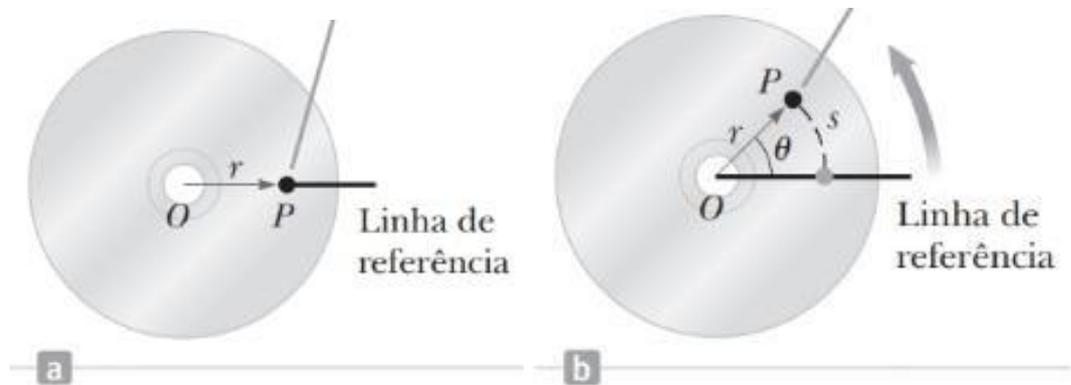


Figura 4: Um *Compact Disc* girando sobre um eixo fixo que passa pelo ponto “O” perpendicular ao plano da figura
Fonte: Serway, 2014.

Observa-se na figura 4 (a) que para definir a posição angular do disco, uma linha de referência é estabelecida e uma partícula P é determinada sobre esta linha a uma distância r do eixo de rotação que passa por O. Na figura 4 (b) é possível observar que conforme o disco gira, a partícula P se move por um comprimento de arco s em um círculo de raio r , onde a posição angular de P é representada por θ .

Cutnell (2016) diz que o deslocamento angular de uma partícula pode ser apresentado em três unidades possíveis que são elas:

O grau, representado pelos 360° graus existentes na circunferência, a velocidade angular, dada por uma volta completa nos 360° da circunferência mais conhecida como RPM e o radiano, unidade mais usual no SI dada pela razão entre o comprimento do arco realizado pelo deslocamento do ponto P e o raio da circunferência até o ponto P demonstrado na figura 5.

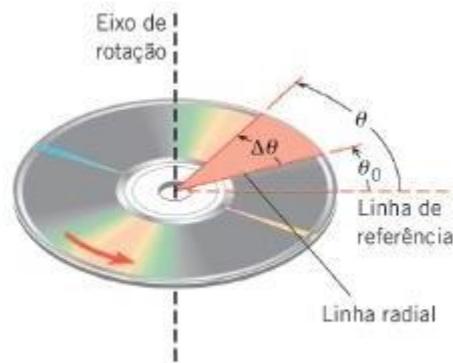


Figura 5: O deslocamento angular de um CD é o ângulo $\Delta\theta$ varrido por uma linha radial enquanto o disco gira em torno do seu eixo de rotação. Fonte: Cutnell 2016.

A equação que define o ângulo θ em radiano representado na figura 5 é dada por:

$$\theta(\text{em radanos}) = \frac{s}{r} \quad (4)$$

Onde (s) é o comprimento do arco, (r) o raio da circunferência e (θ) o ângulo dado em radianos. Sabe-se o comprimento de uma circunferência e é dado por $2\pi r$ e que uma circunferência completa tem 360° , portanto tem se a seguinte relação:

$$\theta = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi \text{rad} \quad (5)$$

Como $2\pi r$ corresponde a 360° tem se que:

$$1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57,3^\circ \quad (6)$$

Para Cutnell (2016), o uso do radiano se torna útil, pois é possível expressar o ângulo (θ) para qualquer ponto da circunferência.

Baseado nestes conhecimentos pode-se agora inserir a ideia de velocidade angular média (\bar{V}), aceleração angular e velocidade tangencial. Começando pela velocidade angular apresentada pela letra grega (ω) que no SI é dado em radianos/segundo e representa o deslocamento da partícula P em um determinado tempo representado pela seguinte equação:

$$\bar{V} = \bar{\omega} = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (7)$$

Onde $(\theta - \theta_0)$ representa o deslocamento angular e $(t - t_0)$ representa o tempo decorrido. A aceleração angular é apresentada pela letra grega (α) é dada pelo SI como rad/s^2 e pode ser interpretada como a variação da velocidade angular em um determinado tempo dada pela equação:

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (8)$$

Onde $(\Delta\omega)$ é a variação da velocidade angular e (Δt) representa o tempo decorrido. A velocidade tangencial (v_t) e aceleração tangencial (a_t) que estão ligadas diretamente a posição do ponto P em relação ao raio da circunferência são dadas pelas equações:

$$v_T = r\omega \quad (9)$$

$$a_t = r\alpha \quad (10)$$

Tendo os conceitos de deslocamento angular em radianos a equação da aceleração centrípeta (a_c) pode ser reescrita como:

$$a_c = \frac{v_t^2}{r} = \frac{(r\omega)^2}{r} = r\omega^2 \quad (\omega \text{ em } \frac{\text{rad}}{\text{s}}) \quad (11)$$

Um assunto de extrema importância para os estudos desse trabalho é sobre a rolagem de uma roda, que segundo Halliday (2022) é a combinação dos movimentos de translação e rotação demonstrados pela figura 6.

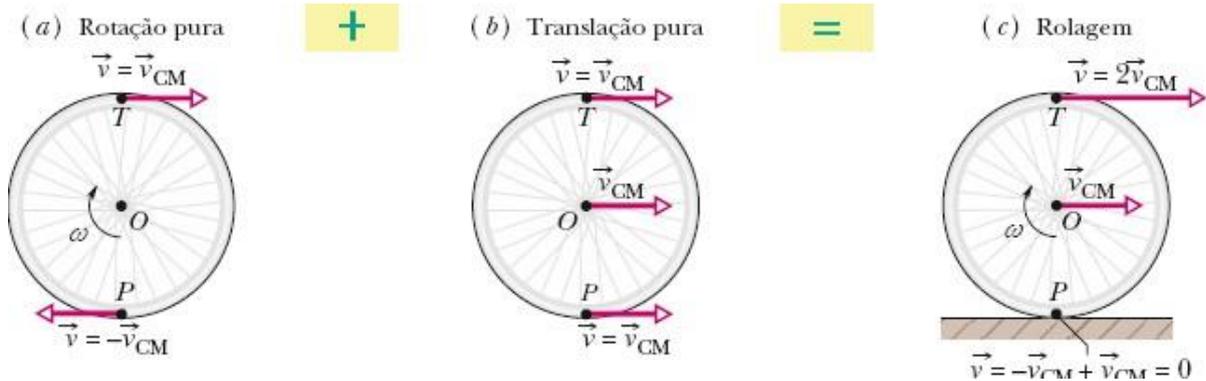


Figura 6: Movimento de rolagem de uma roda como a combinação entre rotação e translação.
Fonte: Halliday 2022.

Como visto na figura 6, o movimento de rolagem de uma roda é a combinação de rotação e translação. Em (a) é mostrado o movimento de rotação pura, onde todos os pontos da roda movem-se com a mesma velocidade angular ω , e todos os pontos da borda movem-se com a mesma velocidade linear. São mostradas as velocidades de dois desses pontos, na borda de cima (T) e na borda de baixo (P) da roda. Em (b) é mostrado movimento de translação pura, onde todos os pontos da roda movem-se para a direita com a mesma velocidade linear. Em (c) é mostrado o movimento de rolagem da roda como uma combinação de (a) e (b). A figura 7 representa o que acabou de ser dito na prática.



Cortesia de Jearl Walker

Figura 7: Fotografia de uma roda de bicicleta em movimento rotacional e translacional
Fonte: Halliday 2022.

Como pode ser observado na figura 7, os raios de baixo estão mais nítidos que os raios de cima, pois estão se movendo mais devagar, provando o que foi demonstrado na figura 6.

Outra maneira de se demonstrar os efeitos conjuntos da rotação e translação na rolagem pode ser visto na figura 8.

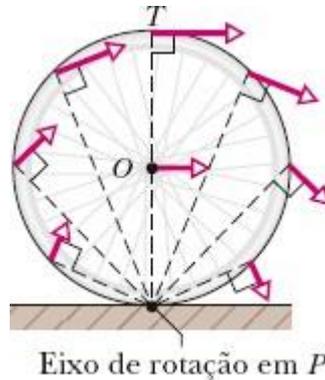


Figura 8: Vetores mostrando a velocidade instantânea da roda em diversas posições.
Fonte: Halliday 2022.

A rolagem pode ser vista na figura 8 como uma rotação pura, com velocidade angular ω , em torno de um eixo que sempre passa por P. Os vetores mostram as velocidades lineares instantâneas de alguns pontos da roda. Esses vetores podem ser obtidos combinando os movimentos de translação e rotação.

2.2 Vibrações mecânicas

Segundo Balachandran (2011), no mundo moderno as pessoas estão cercadas por vários mecanismos rotativos tendo como alguns exemplos os ventiladores, lavadoras de roupa, motores elétricos, de combustão interna entre outros, todos estes apresentam uma característica inerente ao seu movimento de rotação, que é o desequilíbrio, esse desequilíbrio será responsável pelo surgimento de uma força atuante na massa do sistema rotativo. Essa força é transmitida diretamente para um eixo, que transmitirá para o sistema de molas e amortecimento e como consequência essa força será transmitida para a estrutura que a comporta. Conforme Balachandran (2011), esse desequilíbrio poderá ser modelado por uma massa m_0 que girará com uma velocidade angular ω numa posição fixa distanciada do eixo central por ϵ como demonstrado na figura 9.

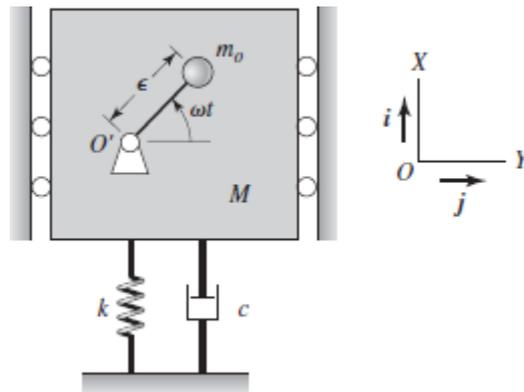


Figura 9: Sistema com massa desbalanceada
Fonte: Balachandran 2011.

O posicionamento da massa geradora do desequilíbrio a uma distância ϵ do eixo O' é demonstrado na figura 9, assim como seu eixo de referência.

O diagrama de corpo livre do sistema pode ser representado pela figura 10.

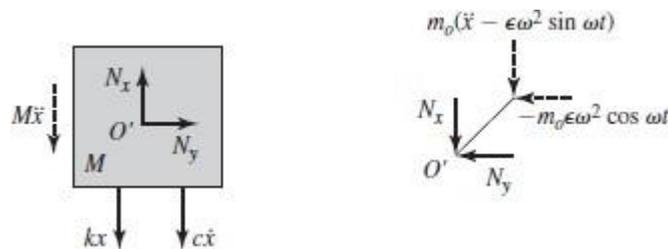


Figura 10: Diagrama de corpo livre do sistema
Fonte: Balachandran 2011.

O modelamento do diagrama de corpo livre apresentando a rigidez (kx), amortecimento ($c\dot{x}$) e eixos de coordenadas é demonstrado na figura 10.

Para o estudo do desequilíbrio é gerada uma equação governante que levará em conta somente a direção vertical, visto que existem suportes laterais restringem os movimentos na direção j . Todo o deslocamento do sistema $x(t)$ é medido a partir do equilíbrio estático e o ponto O' é estabelecido na posição vertical do equilíbrio estático. Através do diagrama de corpo livre, as reações (N_x , N_y) a deformação (ϵ) através da massa desbalanceadora (m_0) que acontecerão no ponto O' serão dadas pelas equações:

$$N_x = -m_0(\ddot{x} - \epsilon\omega^2 \sin \omega t) \quad (12a)$$

$$N_y = m_0 \varepsilon \omega^2 \cos \omega t \quad (12b)$$

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx = N_x \quad (12)$$

Substituindo N_x é possível chegar à equação governante de movimento:

$$(M + m_0) \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = m_0 \varepsilon \omega^2 \sin \omega t \quad (13)$$

que é reescrita como

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\zeta \omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = \frac{F(\omega)}{m} \sin \omega t \quad (14)$$

Onde (ζ) é o fator de amortecimento e (ω_n) é a frequência natural, sendo assim:

$$m = M + m_0 \text{ onde } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow F(\omega) = m_0 \varepsilon \omega^2 \quad (15)$$

$F(\omega)$ é a magnitude da força desbalanceadora que depende diretamente da massa desbalanceada (m_0) proporcional ao quadrado da frequência de excitação, (g) é aceleração da gravidade, dessa forma é obtido o deslocamento estático (δ) da mola que é dada pela equação:

$$\delta_{st} = \frac{(M + m_0)g}{k} = \frac{mg}{k} \quad (16)$$

2.3 Balanceamento

Para Rao (2008), uma massa excêntrica presente em uma roda ou disco causará um desbalanceamento que em consequência irá gerar vibrações, que podem ser toleráveis ou não dependendo do sistema rotativo. Essa vibração causada pelo desbalanceamento poderá ser eliminada através da retirada ou adição de uma massa igual à massa excêntrica, que deve ser instalada em uma posição tal no sistema rotativo que cancele o desbalanceamento. Isso ocorre devido a causas naturais inerentes ao processo de fabricação como usinagem, presença de soldas ou dispositivos de fixação do sistema rotativo, união de várias peças com massas e formatos diferentes para se formar um componente e também pela presença de uma ou mais peças fora de simetria do sistema por necessidade de projeto (RAO 2008).

Para Norton (2011), um mecanismo rotativo pode ser balanceado estaticamente (balanceamento em um plano) ou dinamicamente (balanceamento em dois planos). O balanceamento estático compõe uma etapa do balanceamento dinâmico, assim realiza-se o balanceamento de forma completa. Contudo, existem sistemas rotativos que podem ser balanceados apenas estaticamente, que são os sistemas onde as dimensões na largura são bem menores que as dimensões de diâmetro, isso poupará tempo e recursos. Mesmo o balanceamento se chamado estático ele é aplicado a sistemas que se movimentam e as forças desbalanceadora nesse sistema, como a força $F(\omega)$ vistas no item 2.2 são devidas as acelerações das massas, a premissa é que para se obter o balanceamento estático é preciso que a soma (Σ) de todas as forças presentes no sistema incluindo as inerciais sejam iguais a zero, disse (NORTON 2011).

$$\sum F - ma = 0 \quad (17)$$

Norton (2011) diz que o balanceamento estático é mais simplificado, pois ele pressupõe que as massas geradoras das forças inerciais estão em um mesmo plano tratado em duas dimensões. Como exemplos de sistemas desbalanceados que são solucionados pelo balanceamento estático cita-se: polias, engrenagens, conjunto roda pneu, volantes de inércia delgados, hélices de avião e pás de turbina. Esses sistemas rotativos têm em comum as dimensões axiais bem menores que suas dimensões radiais, donde sai a ideia de as forças estarem em um mesmo plano.

Rao (2008) cita como exemplo de balanceamento estático o balanceamento feito em um disco sustentado por um eixo que é apoiado por dois mancais localizados em suas extremidades como demonstrado pela figura 11.

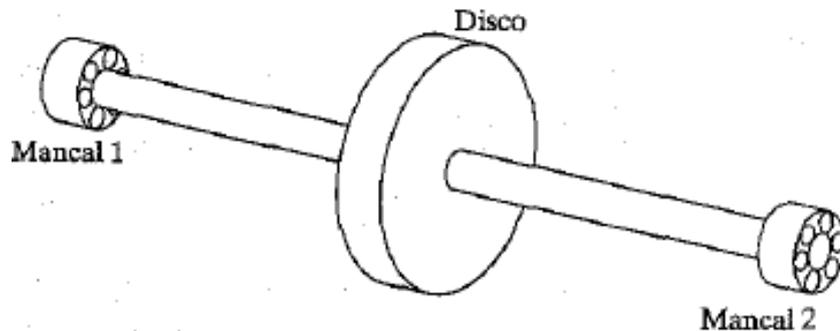


Figura 11: Balanceamento de um disco em um plano
Fonte: Rao, 2008.

Para se balancear o disco da figura 11 é preciso que se gire esse disco e logo após sua parada é feita uma marcação na parte mais baixa, em seguida é instalada uma massa geralmente de chumbo na parte oposta a marcação. Repete-se esse processo por várias vezes alterando-se a massa de chumbo e sua posição (tentativa e erro), observando e anotando onde as marcações feitas no disco pararam. Se as marcas estiverem distribuídas de forma aleatória é um sinal de que o disco está balanceado, caso contrário, ao se parar o disco as marcações estiverem concentradas em uma mesma região é sinal de que o disco anda continua desbalanceado. A quantidade de desbalanceamento poderá ser estabelecida através do giro do disco a uma velocidade (ω) e obtida pelas reações nos mancais. Supondo que uma massa desbalanceadora (m) esteja localizada a uma distância (r) do eixo, esta fará com que a força centrífuga seja dada por ($m r \omega^2$), onde (a_2, a_1) são as distâncias do centro do disco aos mancais e (l) a distância de um mancal ao outro. Desta forma as reações nos mancais serão dadas pelas equações:

$$F_1 = \frac{a_2}{l} m r \omega^2 \quad F_2 = \frac{a_1}{l} m r \omega^2 \quad (19)$$

Que são demonstradas pela figura 12.

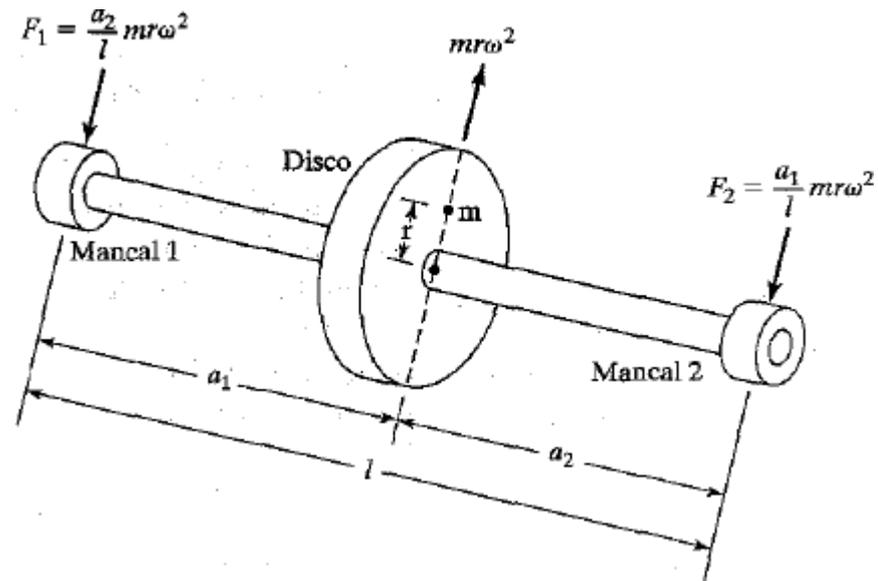


Figura 12: Forças atuantes nos mancais de rolamento
Fonte: Rao, 2008.

Na figura 12 é possível observar as forças atuantes nos mancais de sustentação do eixo devido ao desbalanceamento.

Outra forma de se balancear um sistema rotativo, constitui-se da utilização de um analisador de vibração como demonstrado na figura 13.

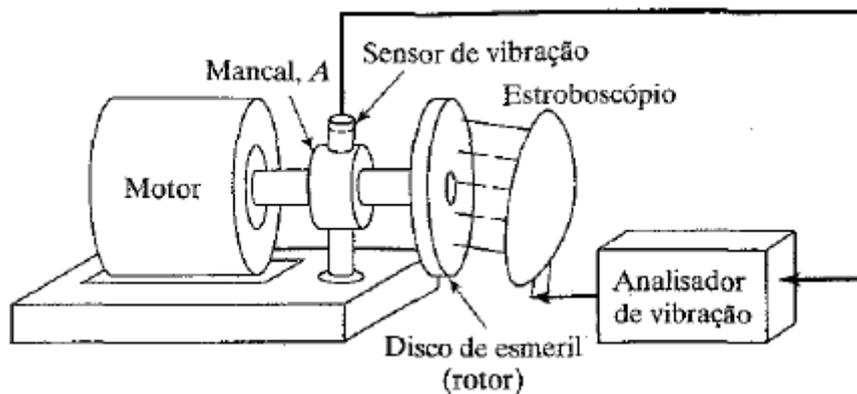


Figura 13: Balanceamento em um plano utilizando analisador de vibração
Fonte: Rao 2008.

A figura 13 apresenta um disco de esmeril desbalanceado ligado a um eixo sustentado por um mancal que por sua vez está ligado a um motor que faz com que o mesmo gire a uma velocidade ω .

Como início do procedimento, são feitas marcações no rebolo do esmeril chamadas de marcas de fase mostrada na figura 14(a) em seguida é instalado um sensor de vibração diretamente no mancal, esse sensor está em sintonia com a velocidade angular ω do motor e irá captar os sinais (amplitude e deslocamento) produzidos pelas vibrações causada pela massa desbalanceadora (peso experimental). A direita do rebolo do esmeril é instalada uma luz estroboscópica figura 13, em ângulo (θ) com a marca de fase da figura 14(a). O motor entrará em giro, o analisador fará a detecção tanto do ângulo θ quanto da amplitude A_u causada pelo desbalanceamento original e essa informação será guardada. Na sequência o motor é parado e então é instalado um peso de massa W conhecida demonstrado na figura 14(b), entrando novamente em giro a uma velocidade angular ω a nova posição da marca de fase (ϕ) e a amplitude de vibração causada por (A_{u+w}) serão guardadas. O passo a passo do procedimento é demonstrado através das Figura 14(a), (b), (c), (d):

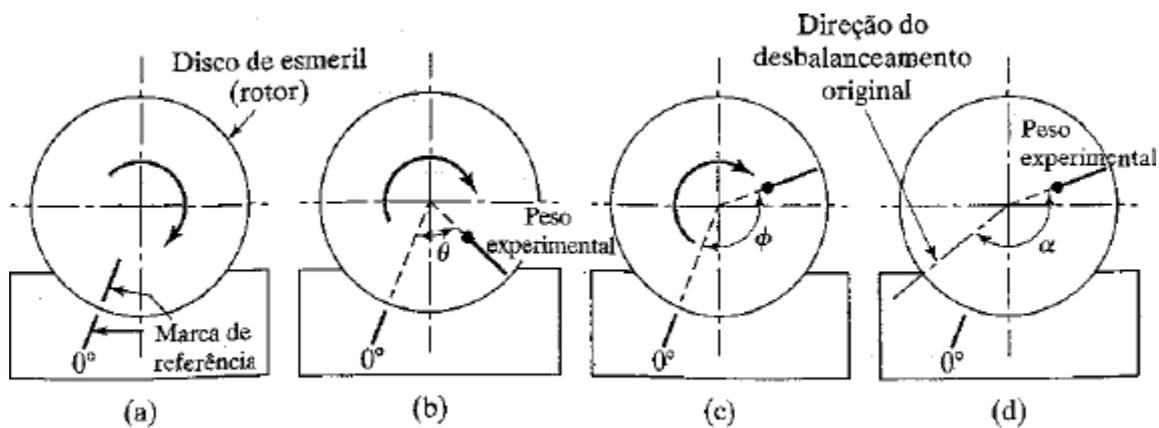


Figura 14(a), (b), (c), (d): Utilização de marcas de fase
Fonte: Rao, 2008.

Na figura 14(c) observa-se a marca de fase (ϕ) após o giro do disco, se o peso experimental for colocado em uma posição que desloca o desbalanceamento resultante no sentido horário, a posição estacionária da marca de fase será deslocada para exatamente a mesma quantidade na direção anti-horária e vice-versa.

Construindo um diagrama de vetores é possível a determinação da quantidade de massa que será precisa e sua posição.

A figura 15 demonstra o vetor do desbalanceamento (A_u) que é colocado em uma direção aleatória e seu tamanho definido por (A_w). Na figura também aparece o vetor desbalanceamento (A_{u+w}) com um ângulo (ϕ) defasado de (θ) em relação ao vetor (A_u) de comprimento ($A_{u+w} - A_u$).

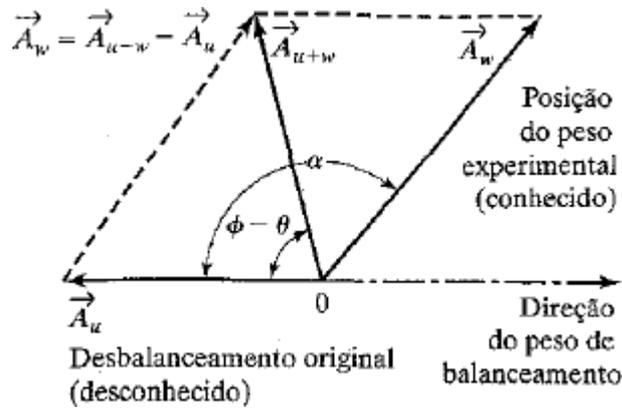


Figura 15: Desbalanceamento devido ao peso experimental W
Fonte: Rao, 2008.

Pode se observar na figura 15 o desenho esquemático dos vetores que representa o desbalanceamento original e desbalanceamento causado pela massa W desbalanceadora instalada no sistema.

A quantidade de massa (A_w) poderá ser calculada através da lei dos cossenos pela equação:

$$A_w = [A_u^2 + A_{u+w}^2 - 2A_u A_{u+w} \cos(\phi - \theta)]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Sendo (α) o ângulo entre a massa do peso experimental (w) em relação ao desbalanceamento original figura 14(d), esse também poderá ser obtido pela lei dos cossenos:

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{A_u^2 + A_w^2 - A_{u+v}^2}{2A_u A_w} \right] \quad (19)$$

A quantidade de massa do balanceamento original (w_0) é igual à relação ($A_u/A_w \times w$) localizado à mesma distância radial em relação ao eixo de rotação do rotor que a massa (w).

Como já se tem a localização e a massa (w_0), a massa de correção poderá ser adicionada ou retirada obtendo-se assim o balanceamento do conjunto rotativo esmeril.

Como visto anteriormente, nenhum sistema rotativo após a última etapa de sua fabricação é perfeitamente balanceado por si só. Isso se deve a fatores como: Escolha e qualidade do material, mecanismos de fabricação, equipamentos utilizados em sua produção, tipos de combinação e montagem do mecanismo de interesse.

Norton (2011) cita as características dos materiais construtivos utilizados num sistema roda pneu e sua montagem como forma de um desbalanceamento natural. Um conjunto roda pneu, onde a roda por ser de um material mais homogêneo e ter a geometria da seção transversal mais simétrica (poderá) estar livre do desbalanceamento natural, porém o mesmo não acontece com o pneu, pois este é formado por materiais com características diferentes chamados de compósito, que são compostos por elastômero de borracha sintética, cordonetes e fios metálicos. O processo de fabricação também tem grande influência no desbalanceamento, onde esse compósito é comprimido através de vapor sob alta temperatura em um molde curvo, resultando num material com grande variabilidade de densidade e geometria que são afetados na etapa de desmoldagem e resfriamento.

Neste capítulo foram descritas as bases teóricas com que essa pesquisa foi formulada, de forma a realizar um experimento que se aproximasse ao máximo da realidade encontrada no uso habitual de um elemento de máquina constituído por um conjunto roda pneu.

3 METODOLOGIA

Dando sequência ao trabalho, o terceiro capítulo visa demonstrar o tipo de metodologia aplicada no desenvolvimento, assim como a forma de abordagem, os procedimentos técnicos, a classificação quanto aos levantamentos, os tipos de pesquisa realizados, os tratamentos dos dados obtidos e dos objetivos para a realização do estudo sobre balanceamento de sistemas mecânicos rotativos através de micro esferas.

3.1 Tipo de pesquisa

De acordo com Marconi apud Selltiz *et al* (2021, p.15) a finalidade da pesquisa é:

Descobrir respostas para questões, mediante a aplicação de métodos científicos”, esses métodos, mesmo que, às vezes, não obtenham respostas fidedignas, são os únicos que podem oferecer resultados satisfatórios ou de total êxito.

Segundo Gil (2022), a pesquisa pode ser definida como um processo racional e sistemático que visa fornecer respostas às questões colocadas, a explanação é necessária quando não há informações suficientes para resolver um determinado problema, ou quando as informações disponíveis são tão superficiais que não podem ser convenientemente relacionada ao problema, uma determinada pesquisa é desenvolvida aproveitando o conhecimento existente e utilizando-se de métodos e técnicas de pesquisa científica, sendo que o processo de desenvolvimento de uma pesquisa envolve múltiplas etapas, desde fazer as perguntas de maneira adequada até a apresentação de resultados satisfatórios (GIL, 2022).

3.1.1 Quanto a forma de abordagem

Para Minayo (2003) pesquisar é um processo contínuo e dinâmico que pode ser realizado em diferentes níveis de profundidade e amplitude, podendo ser classificada de acordo com a forma de abordagem utilizada, sendo elas qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa é interpretativa e visa a compreensão de fenômenos sociais e culturais. Ela se caracteriza por utilizar técnicas que permitem a coleta de dados não numéricos, como entrevistas, observação participante e análise de documentos.

Já a pesquisa quantitativa, base desse trabalho é utilizada para estudar fenômenos que são difíceis de descrever numericamente, como os significados, os valores e as relações humanas, ela permite que o pesquisador tenha um contato mais próximo com o objeto de estudo e compreenda suas condições de contorno e complexidades. A análise, a descrição e o registro das informações fundamentarão o conhecimento e compreensão do tema investigado.

3.1.2 Aos objetivos da pesquisa

Em se tratando de objetivos Gil (2022) apresenta três tipos, os descritivos, explicativos e os objetivos exploratórios, sendo este último utilizado neste trabalho tem por intenção criar um contato mais estreito com o problema, visando explicitar e ou construir hipóteses para o problema, este tende a ter uma organização mais flexível por objetivar os mais variados aspectos relacionados ao fato ou fenômeno em estudo. Os dados nesse tipo de objetivo são coletados através de levantamentos bibliográficos, entrevistas com pessoas experientes que tenham convívio com o problema ou que tenham conhecimentos relevantes sobre o assunto em questão e através do contato com outros estudos os quais tenham a mesma linha de raciocínio. Esse tipo de objetivo é o encontrado na maioria das pesquisas acadêmicas devido a uma falta de definição clara do que se irá investigar.

3.1.3 Aos procedimentos técnicos

3.1.3.1 Pesquisa bibliográfica

Para Nascimento (2012) pesquisa bibliográfica certamente é uma das tarefas mais praticadas na realização dos trabalhos e estudos monográficos, que segundo é através desse tipo de pesquisa que será possível encontrar os meios para explicar e discutir, com base em informações teóricas publicadas em livros e revistas especializadas sobre o assunto, esses darão o aprendizado, a problemática e os desafios que serão precisos para desenvolver, delimitar e eliminar o problema. A pesquisa bibliográfica vem a ser a consulta a um número variado de obras que abordem o mesmo assunto para que o pesquisador assim possa verificar e constatar as variações existentes sobre aquele tema que em certas situações chegam a ser conflitantes cabendo a ele fazer a diversificação de pensamentos em relação aos autores, o que proporciona ao pesquisador a ampliação do seu conhecimento através da leitura seletiva. A pesquisa bibliográfica fundamenta o aumento do conhecimento e trabalha a capacidade de aprendizado, ou seja, a de se tornar um autodidata, embora, inicialmente necessite contar com a orientação de um professor. É através da pesquisa bibliográfica que o autor desenvolve uma

prática importante, que contribui para o aumento de seu próprio conhecimento, essa prática diz respeito ao contato com uma gama de caminhos para a obtenção de informação, proporcionando o cruzamento das opiniões de diversos autores que, de certa forma, parecem dissertar sobre o mesmo assunto. A bibliografia escolhida tem como foco, obrigatoriamente, contribuir para a construção dos argumentos e para a fundamentação do assunto que representa o caminho que os cientistas já percorreram e que o autor precisa trilhar para se tornar um deles. Ao autor compete aproveitar a oportunidade para que durante a pesquisa seja possível localizar e identificar os argumentos necessários e importantes que servirão de base para a formulação das soluções como respostas às questões que foram elaboradas, uma vez que pesquisar significa ir além da procura pela verdade. Um caminho na busca pelas bibliografias estão as bibliotecas que em razão do avanço tecnológico da informática, se encontram em condições de prestar serviços inestimáveis aos autores com uma diversidade de informações em fontes como trabalhos científicos, anais de congressos, artigos palestras, aulas, dissertações, teses, monografias, planos de negócios, estudos de caso etc., além de livros e revistas especializadas.

3.1.3.2 Pesquisa experimental

Para Nascimento (2012) a pesquisa em laboratório, conhecida como pesquisa experimental, se caracteriza pela realização de estudos experimentais em situações controladas que ocorrem em um ambiente criado especialmente para testar hipóteses através da manipulação das variáveis independentes e da verificação de como as variáveis dependentes se alteram.

Segundo Gil (2022) a pesquisa experimental consiste no delineamento do tipo de estudo mais privilegiado do campo científico. Esse consiste das etapas de determinar um objeto de estudo, selecionar variáveis consistentes capazes de interferir no estudo e definir as formas de controlar e observar os efeitos que essa variável produz no objeto, ou seja, a pesquisa experimental é o tipo de pesquisa em que o pesquisador é o agente ativo e não um observador.

3.2 Materiais e métodos

Visando a possibilidade de se balancear um conjunto rotativo composto por roda pneu através de micro esferas, foram feitas buscas por informações e uma profunda revisão bibliográfica sobre os assuntos inerentes ao estudo como, movimento circular, vibrações

mecânicas e balanceamento estático. Essa busca também foi acompanhada de pesquisa sobre quais componentes poderiam ser utilizados no processo de realização do experimento e o tipo de montagem.

Como orientação do procedimento metodológico foi elaborado um fluxograma contendo cada etapa para a realização deste trabalho que é demonstrado na figura 16.

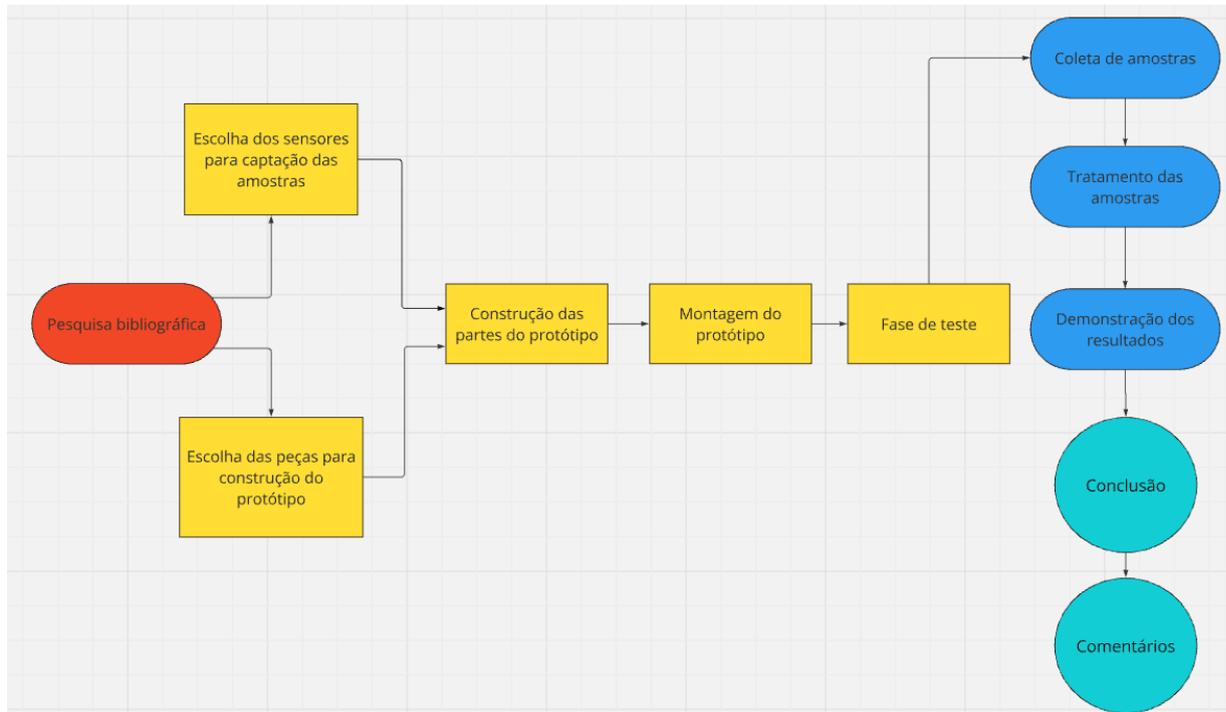


Figura 16: Fluxograma do procedimento metodológico
Fonte: Pesquisa direta, (2024)

Na figura 16 é possível observar as quatro etapas seguidas, destacadas em diferentes cores que vão desde a referência bibliográfica finalizando nos comentários.

Dessa forma chegou-se a um modelo para a realização dos trabalhos experimentais inspirado nas figuras 17 (a) e 17 (b) que demonstram o croqui da montagem do mecanismo para a realização do experimento de balanceamento.

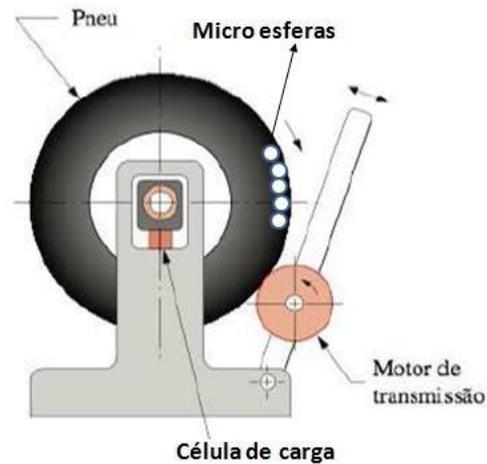


Figura 17 (a): Vista em perfil da montagem experimental.
Fonte: Adaptado de Norton, 2011.

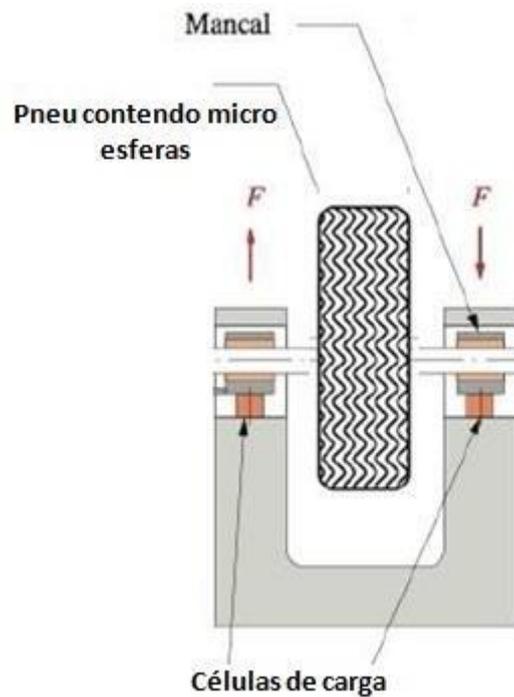


Figura 17 (b): Vista frontal da montagem experimental.
Fonte: Adaptado de Norton, 2011.

Nas figuras 17 (a) e (b) é possível observar um eixo acoplado ao conjunto roda pneu desbalanceado e as micro esferas de balanceamento no interior do pneu, sustentado por dois mancais em suas extremidades. Sob esses mancais foram instaladas duas células de carga de forma a se obter a leitura das forças causadas pelo desbalanceamento. Também é possível observar a presença de um motor de transmissão responsável por fazer com que o conjunto roda pneu entre em movimento através do contato direto com o pneu. Essa configuração

possibilita que haja um controle da velocidade do conjunto roda pneu e assim que atingida a velocidade desejada o motor de transmissão é retirado do contato com a roda, a fim de se preservar a vibração somente do conjunto roda pneu sem a interferência das vibrações existentes no motor de transmissão.

Para que haja a possibilidade do balanceamento do conjunto roda pneu para esse experimento, faz-se a introdução de micro esferas no pneu. Essas esferas são demonstradas pela figura 18.



Figura 18: Micro esferas de vidro
Fonte: Pesquisa direta, (2024).

Na figura 18 é possível observar as micro esferas de vidro com diâmetro variando entre 0,5 a 0,8 mm que serão inseridas no interior do pneu através da válvula de ar para que ocorra um possível balanceamento do conjunto roda pneu.

Para se fazer a leitura das forças de desbalanceamento foram adotadas duas células de carga instaladas entre o mancal de apoio e a extremidade do eixo de sustentação do conjunto roda pneu demonstrados na figura 19.



Figura 19: Célula de carga sensor
Fonte: Pesquisa direta, (2024).

As células de carga demonstrada na figura 19 foram calibradas através de uma peça metálica previamente pesada por uma balança de precisão cordialmente cedida pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) e tem as seguintes especificações:

- Célula de carga marca MK controle modelo CSL/ZL-50
- Capacidade 50 Kg
- - Material: Aço liga
- Sensibilidade: $2,0 \pm 0,004$ mV/V
- Erro Combinado: $\pm 0,03\%$ FS
- Efeito de Temperatura na Sensibilidade: $\pm 0,017\%$ FS / 10°C
- Efeito de Temperatura no Zero: $\pm 0,023\%$ FS / 10°C

- Faixa Compensada: $-10 \sim +40^{\circ}\text{C}$
- Temperatura Operacional: $-35 \sim +65^{\circ}\text{C}$
- Tensão de Excitação: $5 \sim 12 \text{ VDC}$ (máximo 15 VDC)
- Impedância de Entrada: $350 \pm 5 \Omega$
- Impedância de Saída: $350 \pm 3 \Omega$
- Faixa de Sobrecarga Admissível: $150\% \text{ FS}$
- Faixa Máxima de Sobrecarga: $300\% \text{ FS}$
- Nível de Proteção: IP66

Contendo um erro de medição na ordem de $\pm 15\%$.

O conjunto motor/roda de atrito responsável pela colocação do conjunto roda pneu em movimento é demonstrado pela figura 20.



Figura 20: Motor de transmissão
Fonte: Pesquisa direta, (2024).

Esse conjunto é responsável por colocar o conjunto roda pneu em movimento. Consiste de um disco de material plástico com borda em borracha de 200mm de diâmetro por 25mm de espessura acoplado ao eixo de um motor elétrico de indução utilizado em ventiladores caseiros que é dotado de uma chave seletora capaz de controlar sua rotação.

A figura 21 representa a roda de bicicleta utilizada nos experimentos. A roda adotada é da marca Shimano com medidas de aro iguais a 26" X 1,9mm dotada de rolamentos de cerâmica com o objetivo de minimizar o atrito entre as peças móveis. Para o primeiro experimento o pneu tradicional foi substituído por uma mangueira de borracha transparente, conhecida popularmente como mangueira de cristal que é facilmente encontrada em lojas de materiais de construção. A substituição do pneu pela mangueira, teve como objetivo a observação do comportamento das micro esferas no interior do 'pneu' (mangueira) sob efeito do movimento em diferentes velocidades. A medida adotada para a mangueira foi de 1 ½" de diâmetro. Em uma segunda bateria de medições a mangueira foi substituída por um pneu de borracha verdadeiro.



Figura 21: Roda de bicicleta
Fonte: Pesquisa direta, (2024).

Na figura 22 é possível observar a estrutura feita em tubo de aço carbono SAE 1020 com diâmetro externo de 1” na espessura 1,25mm. Este contém em seu topo uma plataforma construída do mesmo material feita para receber as células de carga onde estão fixados os mancais e eixo de sustentação do conjunto roda pneu. Em sua parte inferior foi construída uma base em aço revestida em borracha de forma a possibilitar a fixação do garfo em uma base fixa.

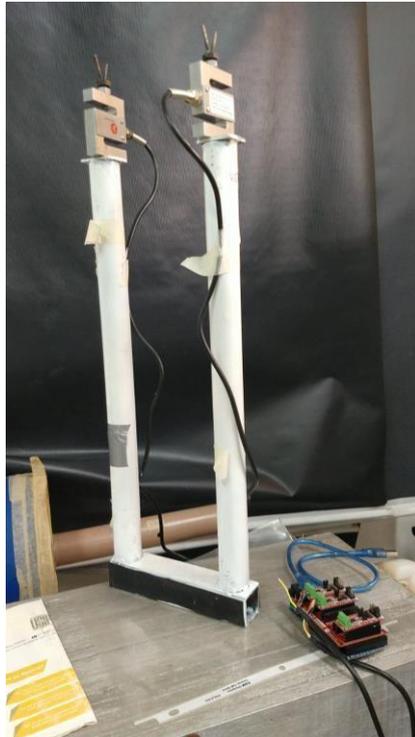


Figura 22: Suporte dos mancais de sustentação da roda
Fonte: Pesquisa direta, (2024).

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (2022) a definição de variável usualmente dita, vem a ser tudo aquilo que pode assumir diferentes valores numéricos, como, por exemplo: temperatura, idade, renda familiar e número de filhos de um casal, para fins de pesquisa, pode-se entender variável como qualquer coisa, item, ou objeto que pode ser classificado em duas ou mais categorias. Assim, sexo é uma variável, porque envolve duas categorias. Classe social também é uma variável, já que pode ser classificada em alta, média e baixa, por exemplo.

Para que haja a variável é preciso que exista a hipótese que segundo Nascimento (2012), estabelece uma relação de causa e efeito entre dois fenômenos, com o objetivo de verificar se determinado efeito se altera quando outro, ou seja a causa é modificada e se essa mudança acontece proveniente da experimentação ou simulação. Esses fatores, conhecidos como causa e efeito são também chamados de variáveis.

No desenvolvimento de uma pesquisa, trabalho científico, além do reconhecimento, faz-se necessário o uso de duas outras formas distintas e complementares abordagens, que são a indução e a dedução:

- **Reconhecimento:** Envolve uma observação abrangente da situação encontrada, na qual são apontados e identificados fatos, dados e relações que se prestem para sua compreensão ou interpretação.
- **Indução:** Refere-se ao conjunto de informações resultantes dos processos de reconhecimento que podem proporcionar a elaboração de princípios, teorias, leis ou modelos que expliquem a situação encontrada, já analisada e observada.
- **Dedução:** Refere-se ao processo em que, se reconhece antecipadamente apenas a causa, é declarado um efeito ainda não conhecido. Esse efeito ainda não confirmado é uma hipótese levantada sobre realidades ou pontos levantados e não investigados.

Indicador para Gil (2022) é uma medida geralmente quantitativa que informa sobre algum aspecto da realidade que está sendo estudado. Assim, tendo um estudo sobre economia como exemplo, patrimônio e renda podem servir como indicadores. A dimensão educacional pode ser medida por indicadores como anos de estudo e títulos acadêmicos. A dimensão prestígio ocupacional, que é mais complexa, pode ser indicada pela ocupação exercida, desde que seja conhecido o prestígio relativo dessa ocupação.

Baseado nesses conceitos são apresentados na tabela 1, as variáveis e seus indicadores referente a esse estudo.

Tabela 1: Variáveis e indicadores

VARIÁVEIS	INDICADORES
Dimensões do conjunto roda pneu	Diâmetro da roda Largura da roda Massa da roda
Micro esferas balanceadoras	Massa de micro esferas suficiente para que ocorra um possível balanceamento Dimensão das micro esferas
Distribuição das micro esferas no interior do pneu	Velocidade de rotação

Fonte: Pesquisa direta (2024).

3.4 Instrumento de Coletas de Dados

Para a obtenção dos sinais emitidos pela célula de carga foi utilizado um arduíno modelo Board Model Mega 2560-R2 como demonstrado na figura 23;

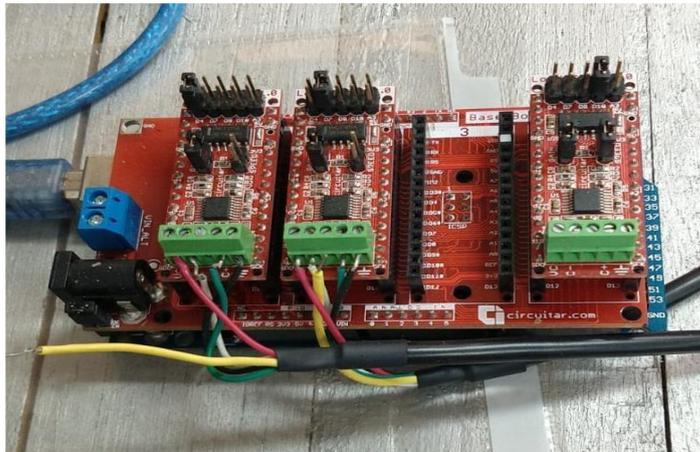


Figura 23: Placa receptora se sinal
Fonte: Pesquisa direta, (2024).

O arduíno é interligado a um computador e é responsável pela transmissão dos sinais advindos das células de carga.

Com a intenção de se medir a velocidade de rotação do conjunto roda pneu, se fez uso de um tacômetro digital como o demonstrado na figura 24.



Figura 24: Tacômetro digital
Fonte: Pesquisa direta, (2024).

O tacômetro é o responsável pela medição da velocidade do conjunto roda pneu sem contato direto com a roda. Isso é feito por meio de um feixe de luz infravermelha que é enviado para a roda e, a partir de um ou mais pontos refletores fixados nesta, é refletido de volta ao equipamento, de forma que os pulsos resultantes de cada ponto refletor possam ser contados pelo mesmo. Ele é usado para que seja possível a análise do comportamento das micro esferas no interior do pneu em diferentes velocidades.

Como forma de medir a massa das diferentes quantidades de micro esferas que foram testadas, utilizou-se de uma balança portátil demonstrada na figura 25, que foi aferida por uma balança de precisão cedida pelo instituto tecnológico Vale.



Figura 25: Balança digital
Fonte: Pesquisa direta (2024).

A tem a capacidade para medição de 1 grama a 10 quilogramas de massa e possui um visor digital.

Para a medição das acelerações verticais do eixo de sustentação, foram utilizados dois acelerômetros como os demonstrados na figura 26.

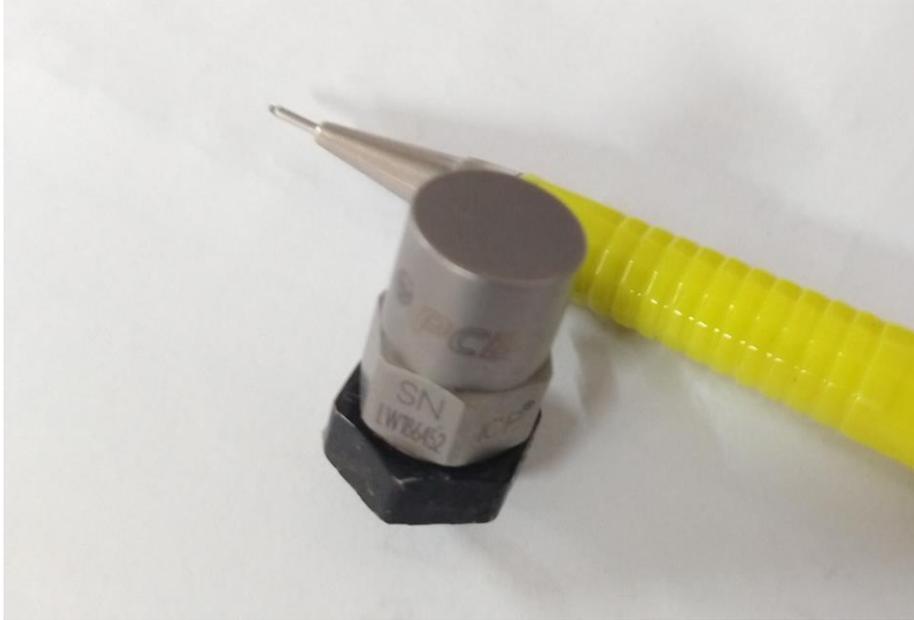


Figura 26: Acelerômetro utilizado nas medições de aceleração
Fonte: pesquisa direta (2024).

O sinal de resposta do sistema é capturado via acelerômetro modelo 352C33 da PCB Piezotronics INC.

Esses acelerômetros apresentam uma sensibilidade de $(\pm 5\%)100$ mV g com faixa de frequência de $(\pm 5\%)$ 2 a 10000 Hz.

3.5 Tabulação dos dados

A tabulação dos dados foi feita obtendo-se os sinais advindos da célula de carga através de um arduíno e dos acelerômetros, que foram interligados a dois computadores, um para cada equipamento, responsáveis por armazenar os sinais das amostras obtidas.

As amostras dos acelerômetros foram tratadas por um programa desenvolvido em linguagem Python e as amostras coletadas pela célula de carga foram tratadas pelos programas Minitab e Microsoft office Excel.

3.6 Montagem do ensaio

Para a realização do ensaio foi utilizada uma montagem que constituiu na colocação de uma roda de bicicleta aro 26” apoiada sobre um garfo tubular com diâmetro de 1^{1/2}”

suportada por um eixo de 5mm de diâmetro que descarrega a carga da roda sobre duas células de carga. Com o intuito de fazer a observação do comportamento das esferas de vidro no interior do pneu durante a simulação, foi utilizada uma mangueira de borracha transparente, conhecida comercialmente como mangueira de cristal com diâmetro de 1^{1/2}". Essa montagem é demonstrada na figura 27.



Figura 27: Montagem do experimento
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Na figura 27 é possível observar os elementos que compõe a montagem do experimento: acelerômetro, célula de carga, pneu (mangueira) e garfo de sustentação.

Com o intuito de se fazer as medições de uma forma real, os ensaios também foram realizados em uma roda com pneu verdadeiro de borracha demonstrado pela figura 28.



Figura 28: roda montada com pneu verdadeiro de borracha.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Na figura 28 é possível ver os modelos de roda e o pneu de borracha utilizado no experimento.

3.7 Da disposição dos instrumentos de medição

Os instrumentos de medição foram selecionados de forma a se obter as leituras dos dados necessários à obtenção dos resultados para o devido experimento.

A instalação dos instrumentos (célula de carga, acelerômetro e tacômetro) foram posicionadas de forma com que estes conseguissem obter os dados para os quais foram construídos.

A célula de carga foi instalada entre o eixo de sustentação e o garfo de apoio como demonstrado na figura 29.

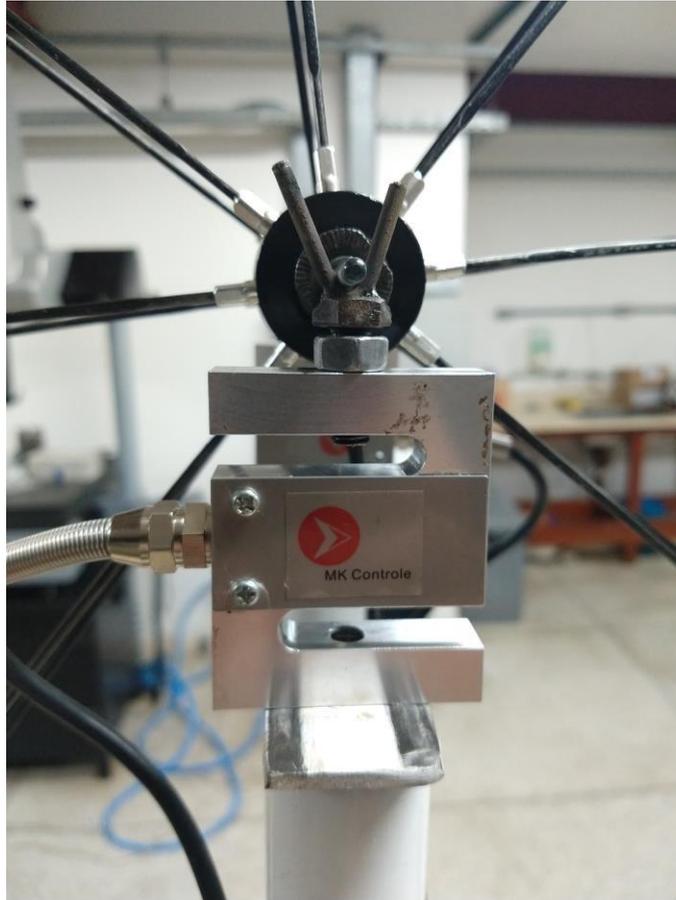


Figura 29: Célula de carga MK Controle
Fonte: Pesquisa direta (2024).

O acelerômetro foi instalado sobre o eixo de sustentação, de forma a captar as frequências geradas pela roda, como demonstrado na figura 30.

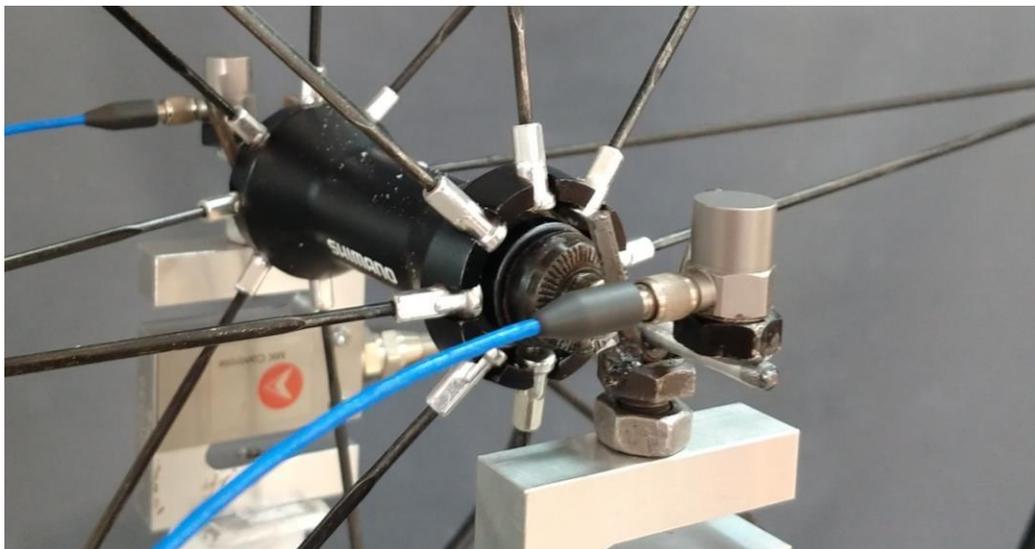


Figura 30: Instalação dos celerômetros.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Para a aquisição da velocidade de rotação, foi instalado um tacômetro digital com medição por infravermelho na parte inferior da roda como demonstrado na figura 31.



Figura 31: Tacômetro digital para medição através de infravermelho da rotação da roda. Fonte: Pesquisa direta (2024).

Na figura 31 é possível ver a instalação do tacômetro junto ao pneu fazendo a medição de rotação.

3.8 Das medições

Para a realização das medições de força e frequência foi necessário a realização do balanceamento tanto do sistema roda mangueira, quanto do sistema roda pneu (verdadeiro) na forma convencional, sendo essa realizada através da adição de uma determinada massa de

chumbo em um determinado ponto no interior centralizado do aro da roda. Essa operação foi realizada da seguinte forma:

Gira-se a roda manualmente e no momento de sua parada faz-se uma marcação no ponto mais baixo da roda, em seguida adiciona-se uma massa qualquer de chumbo no ponto oposto em 180° da marcação. Feito isso gira-se novamente a roda de forma manual e observa-se o ponto de parada da massa colocada, se esta parar na mesma posição anterior é sinal de que a massa de chumbo foi insuficiente. Adicionando mais massa ao sistema, gira-se a roda novamente e observa-se o ponto de parada do chumbo. Essa operação de girar a roda, adicionar, tirar e deslocar essa massa é feita sucessivas vezes até que ela pare em pontos aleatórios a cada operação.

Para certificação do balanceamento desse sistema em estudo, foi adotada a metodologia que consiste em: girar a roda dez vezes em sentido alternados, horário e anti-horário marcando a posição de parada do chumbo. Quanto mais aleatórias forem as posições de parada do chumbo maior a possibilidade de um bom balanceamento. Para esse estudo as posições de parada da massa balanceadora (chumbo) são indicadas na figura 32. É preciso ressaltar, que não há um balanceamento perfeito seguindo esse modelo de balanceamento.



Figura 32: Pontos de parada do chumbo de balanceamento.
Fonte: Pesquisa direta (2024)

3.8.1 Procedimento das medições

As medições foram realizadas por três pessoas trabalhando simultaneamente, uma responsável pelas tomadas de dados dos acelerômetros, outra responsável pela tomada de dados das células de carga e outra responsável por fazer girar o sistema através do contato do conjunto motor/roda de atrito demonstrado na figura 20 ao sistema roda pneu. Esse contato era feito até que a velocidade atingisse uma rotação por volta dos 350 RPM, rotação essa definida previamente, pois através de observações verificou-se que as micro esferas se estabilizavam dentro do pneu em rotações entre 180 e 210 RPM. Assim foram possíveis as medições das acelerações de movimentação do eixo de sustentação da roda no sentido vertical através de dois acelerômetros instalados um em cada ponta do eixo, como demonstrado na figura 30. Dessa forma também foi possível a medição das forças realizadas pelo eixo sobre os mancais através dos dados obtidos pela célula de carga demonstrada na figura 29.

3.8.2 Medições com pneu de borracha verdadeiro

As medições realizadas nessa etapa foram feitas medindo-se a aceleração e frequência da movimentação do eixo de sustentação da roda no sentido vertical através de dois acelerômetros instalados um em cada ponta do eixo figura 30 e da medição de força exercida sobre os mancais através das células de carga como demonstrado na figura 29.

- As medições foram feitas com o sistema roda pneu nas seguintes **condições**:
 1. Primeira medição: código (PBC 43g) pneu balanceado por chumbo (massa de 43g) instalado na parte interna e centralizada do aro, sem introdução de esferas neste, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
 2. Segunda medição: código (PDV) pneu desbalanceado natural vazio, sem adição de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
 3. Terceira medição: código (PDE 20g) pneu desbalanceado com introdução de 20g de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;

4. Quarta medição: código (PDE 43g) pneu desbalanceado com introdução de 43g de esferas. (Massa equivalente ao balanceamento por chumbo), com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
5. Quinta medição: código (PDE 65g) pneu desbalanceado com introdução de 65g de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
6. Sexta medição: código (PDE 85g) pneu desbalanceado com introdução de 85g de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM.

As massas de esferas de vidro foram escolhidas através do seguinte critério: massas menores, iguais e superiores a massa utilizada para a realização do balanceamento por chumbo.

3.8.3 Medições com pneu fictício (mangueira de borracha)

Nesta etapa foram tomados os dados somente de aceleração obtidos a partir dos acelerômetros posicionados segundo a figura 30.

- As medições foram feitas com o sistema roda mangueira nas seguintes **condições**:
 1. Primeira medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, sem introdução de esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
 2. Segunda medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, e adicionada uma massa desbalanceadora conhecida por chumbo instalado na parte interna e centralizada do aro, igual a 15g com introdução de 5g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
 3. Terceira medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, e adicionada uma massa desbalanceadora conhecida por chumbo instalado na parte interna e

centralizada do aro, igual a 15g com introdução de 10g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;

4. Quarta medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, e adicionada uma massa desbalanceadora conhecida por chumbo instalado na parte interna e centralizada do aro, igual a 15g com introdução de 20g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
5. Quinta medição: pneu sem adição de esferas, massa balanceadora e desbalanceadora, ou seja, sistema como desbalanceamento natural, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
6. Sexta medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 10g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
7. Sétima medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 20g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
8. Oitava medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 27g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM. (Massa igual a massa de chumbo capaz de balancear o sistema realizado na primeira medição);
9. Nona medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 35g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
10. Décima medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 45g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM.

Neste capítulo, foram demonstrados os métodos e seus materiais devidamente descritos, as variáveis, os indicadores intrínsecos utilizados nesse tipo de pesquisa e a maneira com que os dados foram coletados. Sendo assim possível realizar um experimento que se

aproximasse ao máximo da realidade encontrada no uso habitual de um elemento de máquina, constituído por um conjunto roda pneu.

No próximo capítulo, serão apresentadas as análises dos resultados relativos à primeira parte do questionário que diz respeito às características do experimento e das possibilidades de utilização do método descrito com efetiva eficiência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados com pneu de borracha verdadeiro

4.1.1 Análise das amostras de aceleração em RMS obtidas através dos acelerômetros no pneu de borracha verdadeiro.

Uma primeira comparação mais simplificada entre os dois tipos de balanceamento sendo eles: (instalação de chumbo na roda) e (introdução de microesferas de vidro no pneu) foi feita pelo tratamento de 3300 amostras de aceleração coletadas para cada acelerômetro. Essas amostras foram obtidas num intervalo de 2 segundos perfazendo uma amostragem a cada 0,6 milissegundos e foram tomadas em cada uma das seis diferentes condições. Essa primeira análise foi feita para a obtenção da aceleração em RMS *Root Means Square*, (do inglês; Valor Quadrático Médio). O RMS fornece uma indicação da intensidade global da vibração, levando em consideração a amplitude e a frequência de todos os componentes presentes no sinal vibratório e consiste em extrair a raiz quadrada da média aritmética elevada ao quadrado de todas as amostras de aceleração, como demonstrado na tabela 2.

Tabela 2: Obtenção do RMS das acelerações em cada acelerômetro.

3298	1,995625	-0,0171174	0,000293005	1,995625	0,0143034	0,000204587
3299	1,99623	-0,0121884	0,000148557	1,99623	0,0267849	0,000717431
3300	1,996836	-0,0943382	0,008899696	1,996836	0,045182	0,002041413
3301	1,997441	0,00259856	6,75251E-06	1,997441	0,00347812	1,20973E-05
3302	Time - cDAQ1Mod1/ai0	m/s^2 - cDAQ1Mod1/ai0		Time - cDAQ1Mod1/ai1	m/s^2 - cDAQ1Mod1/ai1	
3303			0,001415589			0,000424258
3304		RMS acelerômetro 1	0,037624309		RMS acelerômetro 2	0,02059752
3305						
3306						

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Com o agrupamento dos valores encontrados na tabela 2, gerou-se uma tabela contendo todos os dados das acelerações obtidas pelos acelerômetros 1 e 2 em RMS de cada uma das seis condições realizadas nas rotações de 300, 250 e 200 RPM, como demonstrado na tabela 3.

Tabela 3: Compilação dos valores obtidos através do RMS

RODA COM PNEU DE BORRACHA VERDADEIRO						
Condições	AC1 300 RPM	AC1 250 RPM	AC1 200 RPM	AC2 300 RPM	AC2 250 RPM	AC2 200 RPM
Pneu balanceado com chumbo 43g	0,039117334	0,037624309	0,038064226	0,023080064	0,02059752	0,021574084
Pneu desbalanceado vazio	0,064250869	0,039501794	0,121920547	0,100032931	0,049174569	0,095810994
Pneu desbalanceado com esfera 20g	0,091641023	0,048241407	0,034658905	0,102986348	0,052288086	0,025166995
Pneu desbalanceado com esfera 43g	0,088890469	0,046720987	0,034713485	0,115469605	0,054960169	0,026261876
Pneu desbalanceado com esfera 65g	0,104474129	0,048755514	0,034479844	0,141273657	0,060582094	0,027159964
Pneu desbalanceado com esfera 85g	0,099736998	0,049690885	0,030565124	0,147225762	0,065294625	0,024713724

Fonte: Pesquisa direta (2024).

O resultado dos valores compilados das acelerações apresentados pela tabela 3, são demonstrados na figura 33 através de um gráfico de barras agrupadas.

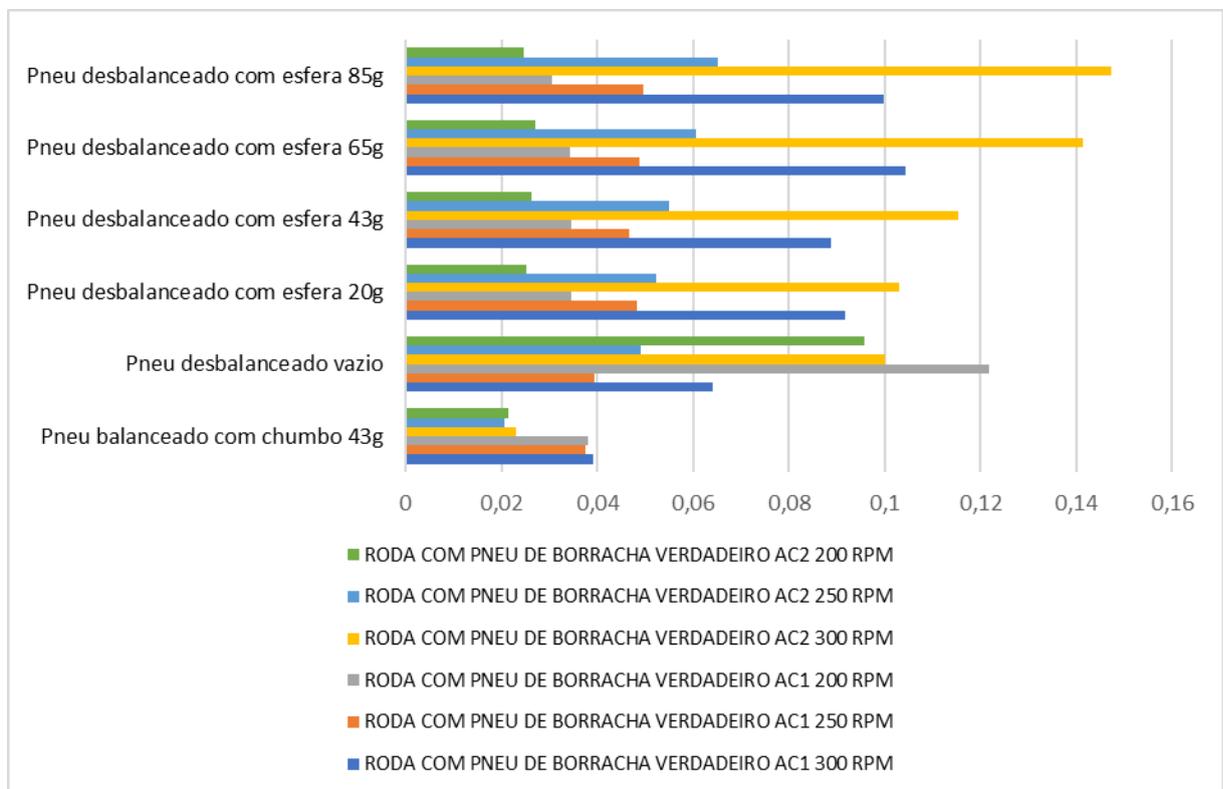


Figura 33: Resultados obtidos através dos valores de RMS dos acelerômetros 1 e 2.

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Na figura 33 é possível observar tanto no acelerômetro 1 como no 2 os maiores valores de aceleração nas condições pneu desbalanceado vazio (PDV) e pneu desbalanceado com esferas (PDE 20 a 85g) em comparação a condição pneu balanceado por chumbo (PBC),

demonstrando assim uma possível ineficiência em balancear um sistema roda pneu através da introdução de micro esferas de vidro no pneu.

4.1.2 Análise das amostras através da transformada de Fourier

4.1.2.1 Comparativo entre diferentes rotações em RPM

Uma segunda comparação entre os dois tipos de balanceamento sendo eles: (instalação de chumbo na roda) e (introdução de microesferas de vidro no pneu) foi feita pelo tratamento de 3300 amostras de aceleração. Esse tratamento foi feito afim de se obter as FFT's, *Fast Fourier Transform* (do inglês; transformada rápida de Fourier), responsável por transformar as amostras que estavam no domínio do tempo, apresentadas na tabela 2, para o domínio da frequência. Para isso, foi realizada uma pré-análise das amplitudes entre rotações, 200, 250, 300 RPM numa mesma condição, repetindo-se para cada uma das seis condições, em cada um dos dois acelerômetros. Isso foi feito para demonstrar a qualidade da montagem do experimento, sendo responsável por gerar 12 gráficos comparativos. O gráfico mais representativo nesse conjunto de tabulação é demonstrado na figura 34A e por sua ampliação da região onde aparece a primeira frequência fundamental demonstrado pela figura 34B, os gráficos que representam o restante das condições estudadas são encontrados no anexo A.

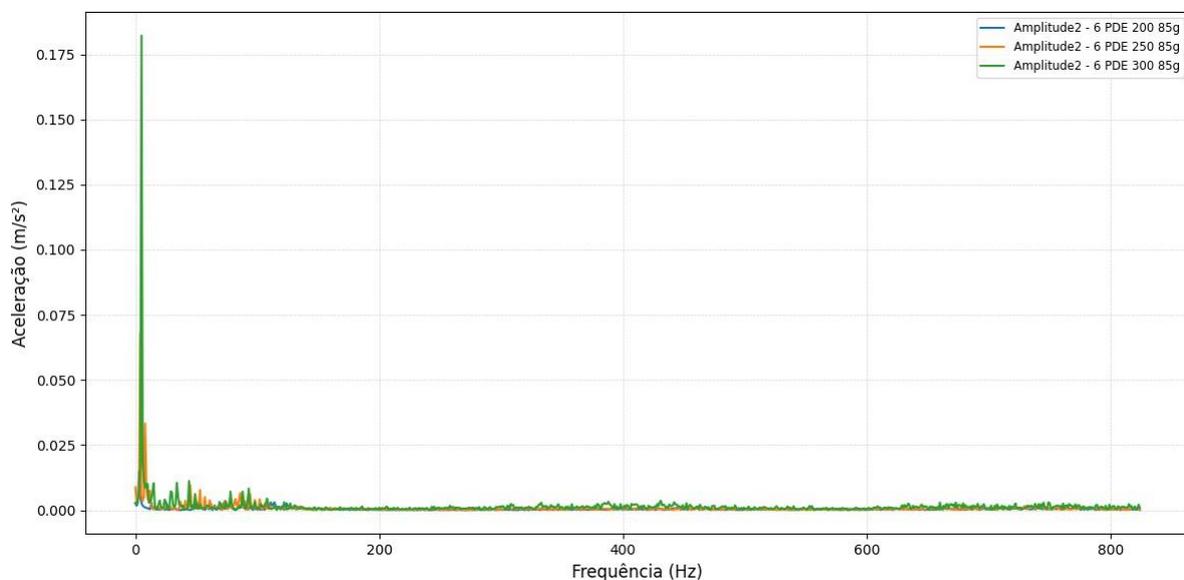


Figura 34A: Gráfico comparativo entre três diferentes rotações e suas frequências fundamentais.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

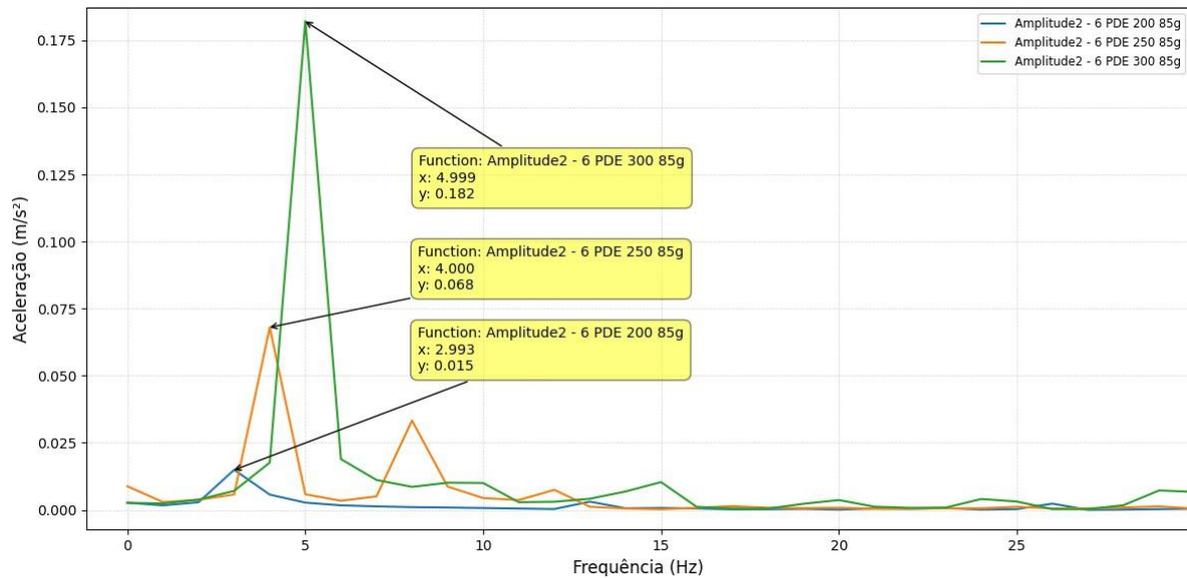


Figura 34B: Ampliação do gráfico comparativo entre três diferentes rotações e suas frequências fundamentais. Fonte: Pesquisa direta (2024).

Como o cálculo da frequência fundamental é dado pela equação:

$$f = \frac{RPM}{60min} \quad (22)$$

Onde f é a frequência fundamental dada em hertz (Hz)

Tem se então as frequências fundamentais para cada rotação:

- $f = \frac{300 RPM}{60min} = 5Hz$
- $f = \frac{250 RPM}{60min} = 4,16Hz$
- $f = \frac{200 RPM}{60min} = 3,33Hz$

Sendo assim é possível observar na figura 34B a aproximação dos picos das três curvas com suas respectivas frequências fundamentais e o crescimento das acelerações em relação ao crescimento da rotação, validando assim o experimento como esperado.

4.1.2.2 Comparação entre pneu balanceado por chumbo e pneu totalmente desbalanceado

Nessa etapa foi realizada a análise do comparativo entre o pneu balanceado através da forma tradicional através da instalação de chumbo (PBC 43g), e o pneu desbalanceado vazio (PDV) (sem esferas), de forma a garantir que o balanceamento feito manualmente através da adição de chumbo obteve êxito. O gráfico mais representativo nesse conjunto de tabulação é demonstrado na figura 35A e por sua ampliação da região onde aparece a primeira frequência fundamental demonstrado pela figura 35B. Os gráficos que representam o restante das condições estudadas são encontrados no anexo B.

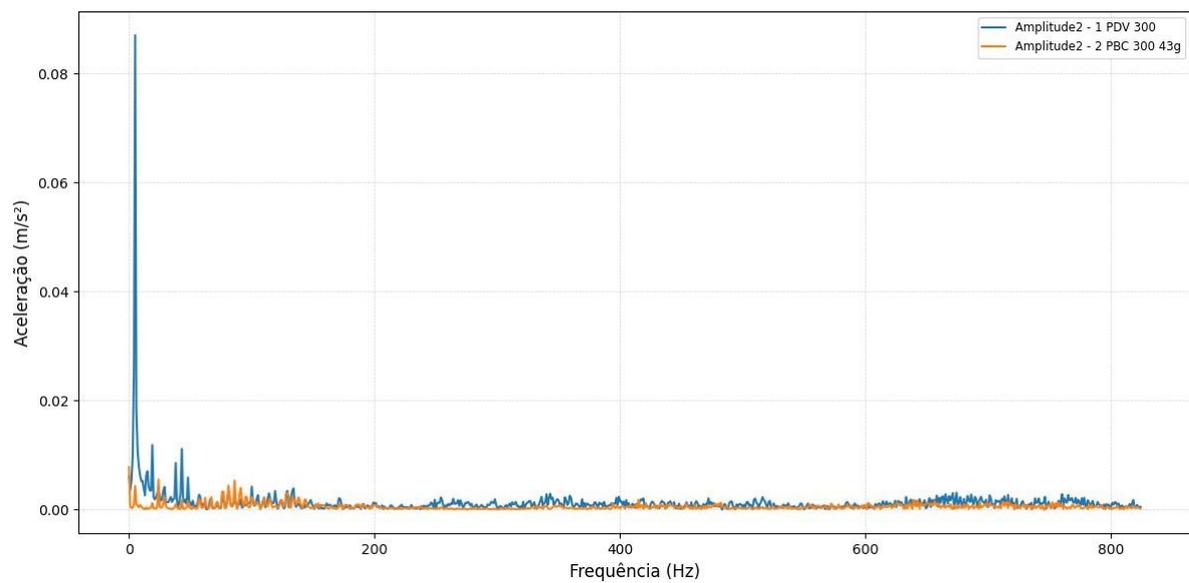


Figura 35A: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

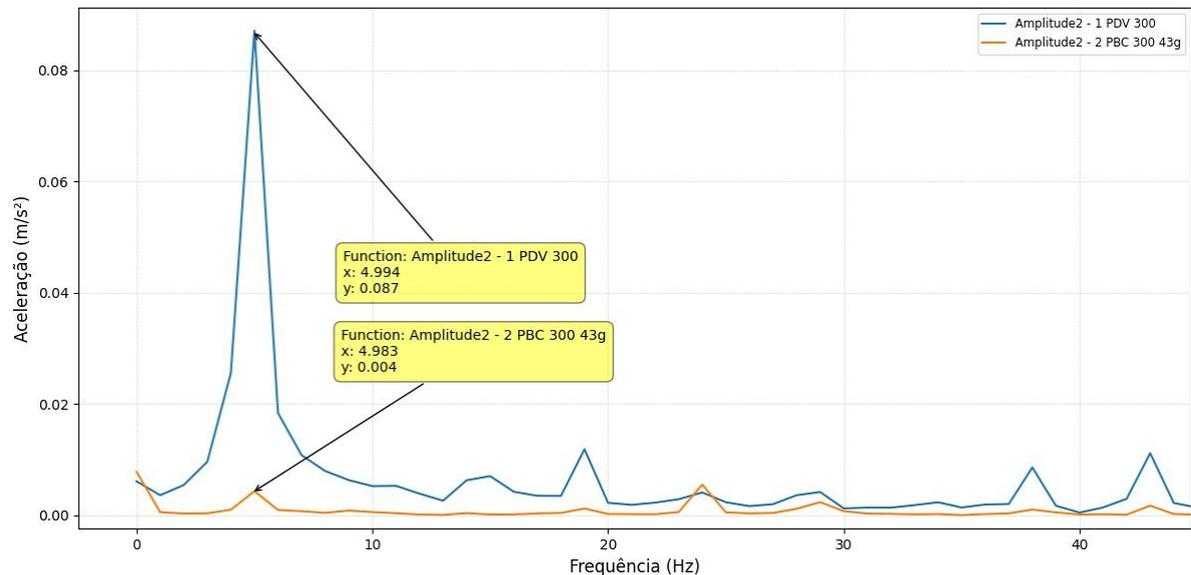


Figura 35B: Ampliação do gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação. Fonte: Pesquisa direta (2024).

Na figura 35B é possível observar os picos nas duas condições: balanceado através da instalação de chumbo (curva laranja) e totalmente desbalanceado (curva azul). O êxito do balanceamento manual através da instalação de chumbo em relação à roda desbalanceada é observado pela diferença nas amplitudes de aceleração entre as duas condições, onde a amplitude da aceleração da roda desbalanceada chega a ser pouco maior que vinte e uma vezes a amplitude da roda balanceada pelo chumbo

4.1.2.3 Comparativo entre o pneu balanceado por chumbo e o pneu balanceado por esferas

Nessa etapa foi realizada a análise do comparativo entre o pneu balanceado através da instalação de chumbo (PBC 43g) e as quatro outras condições estipuladas para o experimento, sendo essas, pneu balanceado pela introdução de microesferas de vidro com massas variando entre (PDE 20g, 43g, 65g, 85g). O gráfico mais representativo nesse conjunto de tabulação é demonstrado na figura 36A e por sua ampliação da região onde aparece a primeira frequência fundamental demonstrado pela figura 36B. Os gráficos que representam o restante das condições estudadas são encontrados no anexo C.

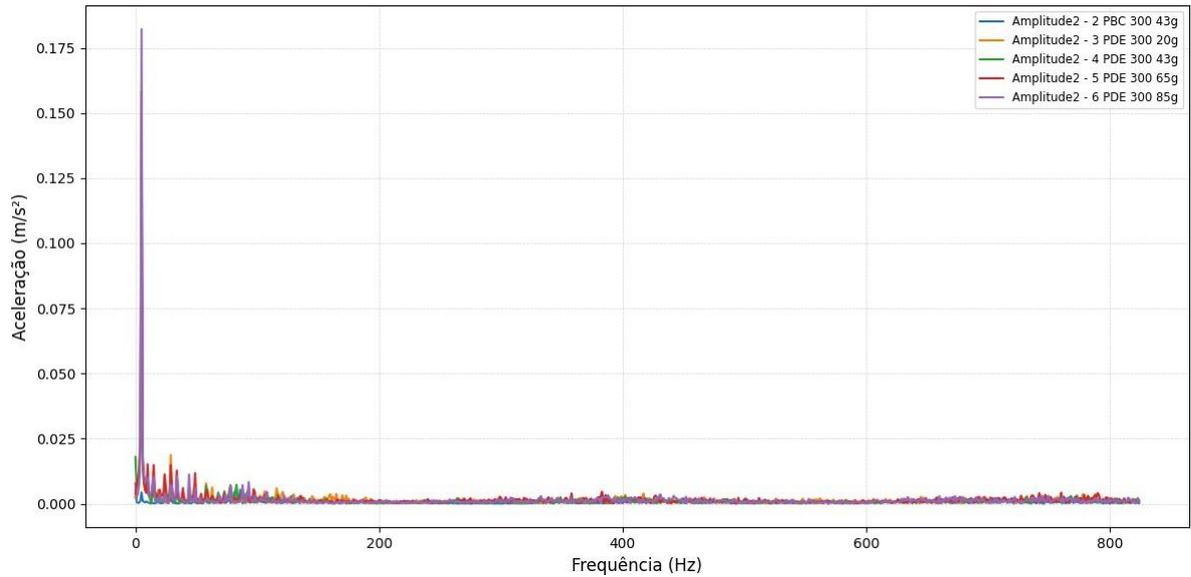


Figura 36A: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação
Fonte: Pesquisa direta (2024)

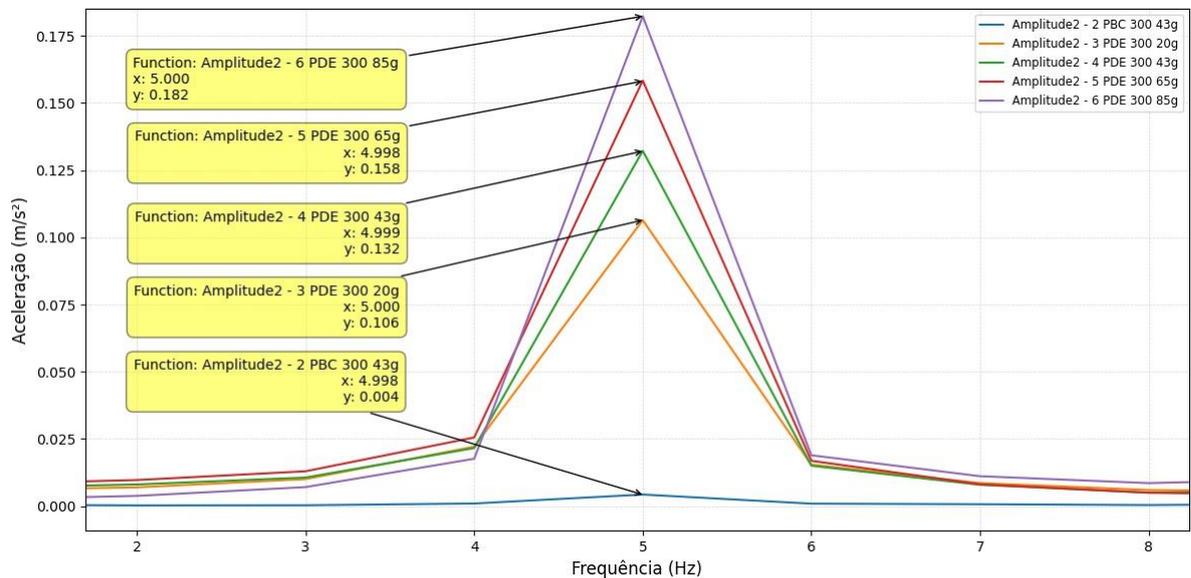


Figura 36B: Ampliação do gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Na figura 36B é possível observar o crescimento nas amplitudes de aceleração em relação ao sistema balanceado por chumbo a medida que são introduzidas e acrescentadas massas de microesferas de vidro no pneu, sendo essas massas (20, 43, 65, 85g). Portanto, fica evidente a piora nas condições de balanceamento do conjunto roda pneu feito pela introdução de microesferas em comparação ao balanceamento manual através da instalação de chumbo.

4.1.3 Análise das amostras obtidas através da célula de carga

As células de carga foram responsáveis por fornecer 3128 amostras de força sobre os mancais de sustentação. A leitura da primeira amostra iniciou-se quando a roda estava a uma velocidade de 300 RPM e a leitura da última amostra foi obtida quando a roda estava a uma velocidade de 200 RPM. As amostras foram organizadas em colunas para cada uma das seis condições e essas foram relacionadas às suas respectivas velocidades em RPM, como demonstrado na tabela 4.

Tabela 4: Valores de força obtidos através da célula de carga.

3125	200,16	235	-10	-42	-123	203	75
3126	200,13	206	-9	63	-79	172	22
3127	200,10	167	-7	112	-27	129	-33
3128	200,06	124	-6	154	27	77	-86
3129	200,03	78	-5	187	81	22	-134
3130	RPM	PDV AC1	PBC43 AC1	PDE20 AC1	PDE43 AC1	PDE65 AC1	PDE85 AC1

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Devido à distribuição aleatória com que os valores das amostras se apresentaram, foi necessário a realização do teste de Kolmogorov – Smirnov, de forma a verificar se esses valores encontrados seguiam uma distribuição normal ou não. Este teste foi realizado no programa estatístico Minitab e seu resultado é demonstrado na figura 37.

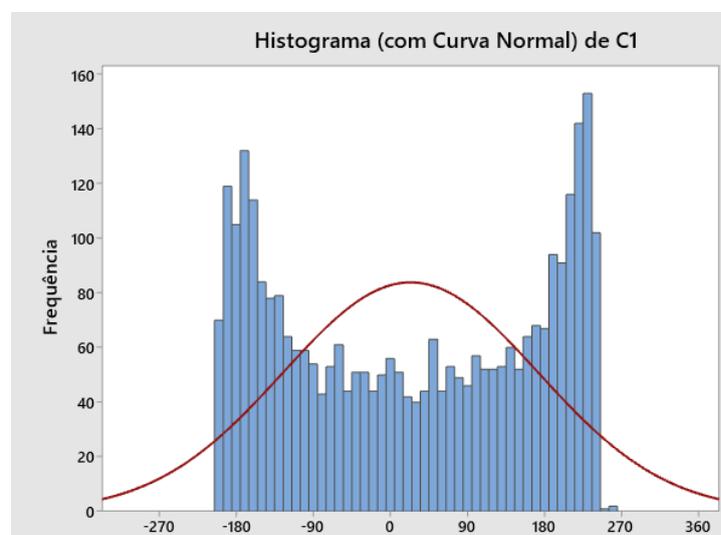


Figura 37: Gráfico comparativo entre uma distribuição normal e os valores obtidos.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Pode-se perceber através da figura 37, que os valores obtidos pela célula de carga não seguiam uma distribuição normal, portanto é recomendável realizar o comparativo entre as seis condições diferentes e suas respectivas velocidades através de um gráfico de caixa. Esse gráfico comparativo entre as seis condições é demonstrado pela figura 38.

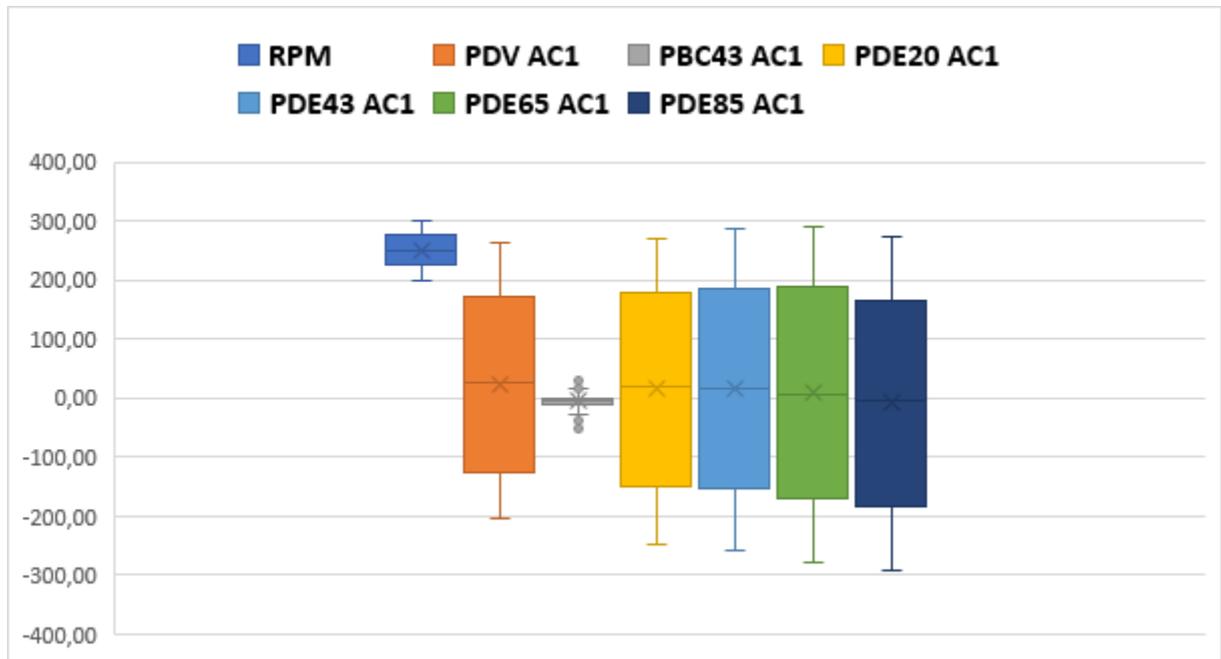


Figura 38: Comparativo entre seis diferentes condições de balanceamento obtidos através da célula de carga. Fonte; Pesquisa direta (2024).

Realizado uma análise não paramétrica das seis diferentes condições para os acelerômetros 1 e 2 demonstrada na figura 38 é possível observar através do gráfico em caixa a grande dispersão de valores no primeiro e terceiro quartis nas condições pneu desbalanceado vazio (PDV) e pneu desbalanceado com esferas (PDE 20 a 85g) em comparação à condição pneu balanceado por chumbo (PBC), demonstrando assim uma possível ineficiência em balancear um sistema roda pneu através da introdução de micro esferas de vidro no pneu.

4.2 Resultados com o pneu (mangueira)

4.2.1 Análise das amostras através da obtenção do RMS com pneu (mangueira)

Devido ao grande número de condições examinadas neste caso, dos possíveis desvios encontrados pelo fato do 'pneu' não ser um pneu verdadeiro (mangueira) e pela consistência

dos dados obtidos no experimento com pneu verdadeiro, a análise para este caso do pneu com mangueira foi feita somente no campo de estudo do RMS, ou seja, as 3300 amostras de aceleração encontradas em cada uma das dez condições consideradas também foram feitas através da obtenção da aceleração em RMS, como demonstrado na tabela 5.

Tabela 5: Obtenção do RMS das acelerações em cada acelerômetro.

3298	1,995625	-0,0171174	0,000293005	1,995625	0,0143034	0,000204587
3299	1,99623	-0,0121884	0,000148557	1,99623	0,0267849	0,000717431
3300	1,996836	-0,0943382	0,008899696	1,996836	0,045182	0,002041413
3301	1,997441	0,00259856	6,75251E-06	1,997441	0,00347812	1,20973E-05
3302	Time - cDAQ1Mod1/ai0	m/s ² - cDAQ1Mod1/ai0		Time - cDAQ1Mod1/ai1	m/s ² - cDAQ1Mod1/ai1	
3303			0,001415589			0,000424258
3304		RMS acelerômetro 1	0,037624309		RMS acelerômetro 2	0,02059752
3305						
3306						

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Com o agrupamento dos valores encontrados na tabela 5, gerou-se uma tabela contendo todos os dados das acelerações obtidas pelos acelerômetros 1 e 2 em RMS de cada uma das dez condições realizadas nas rotações de 300, 250 e 200 RPM, como demonstrado na tabela 6.

Tabela 6: Compilação dos dados de aceleração em RMS

RODA COM MANGUEIRA							
Medição	Condições	Acelerômetro 1 (m/s ²)			Acelerômetro 2 (m/s ²)		
		300 RPM	250 RPM	200 RPM	300 RPM	250 RPM	200 RPM
1	Vazio balanceado com chumbo 27g	0,052120797	0,039419446	0,027072222	0,043764057	0,016433751	0,015357300
2	Desbalanceado por chumbo 15g carga esfera 5g	0,079140639	0,035548414	0,042691457	0,061152730	0,017533476	0,014773652
3	Desbalanceado por chumbo 15g carga esfera 10g	0,036403303	0,033177869	0,040643865	0,021437304	0,015277154	0,015712842
4	Desbalanceado por chumbo 15g carga esfera 20g	0,066405438	0,054748740	0,048363197	0,034661030	0,018644680	0,019935185
5	Vazio desbalanceado natural	0,065517035	0,030644908	0,033706343	0,050089052	0,016604443	0,012751046
6	Desbalanceado natural carga esfera 10g	0,875865457	0,163214226	0,042461020	1,138455388	0,411830436	0,051567508
7	Desbalanceado natural carga esfera 20g	0,488266159	0,078764962	0,043287830	1,754532165	0,106934703	0,048303046
8	Desbalanceado natural carga esfera 27g	0,649701849	0,165557149	0,030903144	2,313654357	0,371412378	0,050381741
9	Desbalanceado natural carga esfera 35g	0,442503604	0,074281716	0,025109054	0,597352437	0,135121711	0,018608552
10	Desbalanceado natural carga esfera 45g	0,508170896	0,215372577	0,043623806	1,071683773	0,526301470	0,053371500

Fonte: Pesquisa direta (2024)

O resultado dos valores compilados das acelerações apresentados pela tabela 6, são demonstrados na figura 39 através de um gráfico de barras agrupadas.

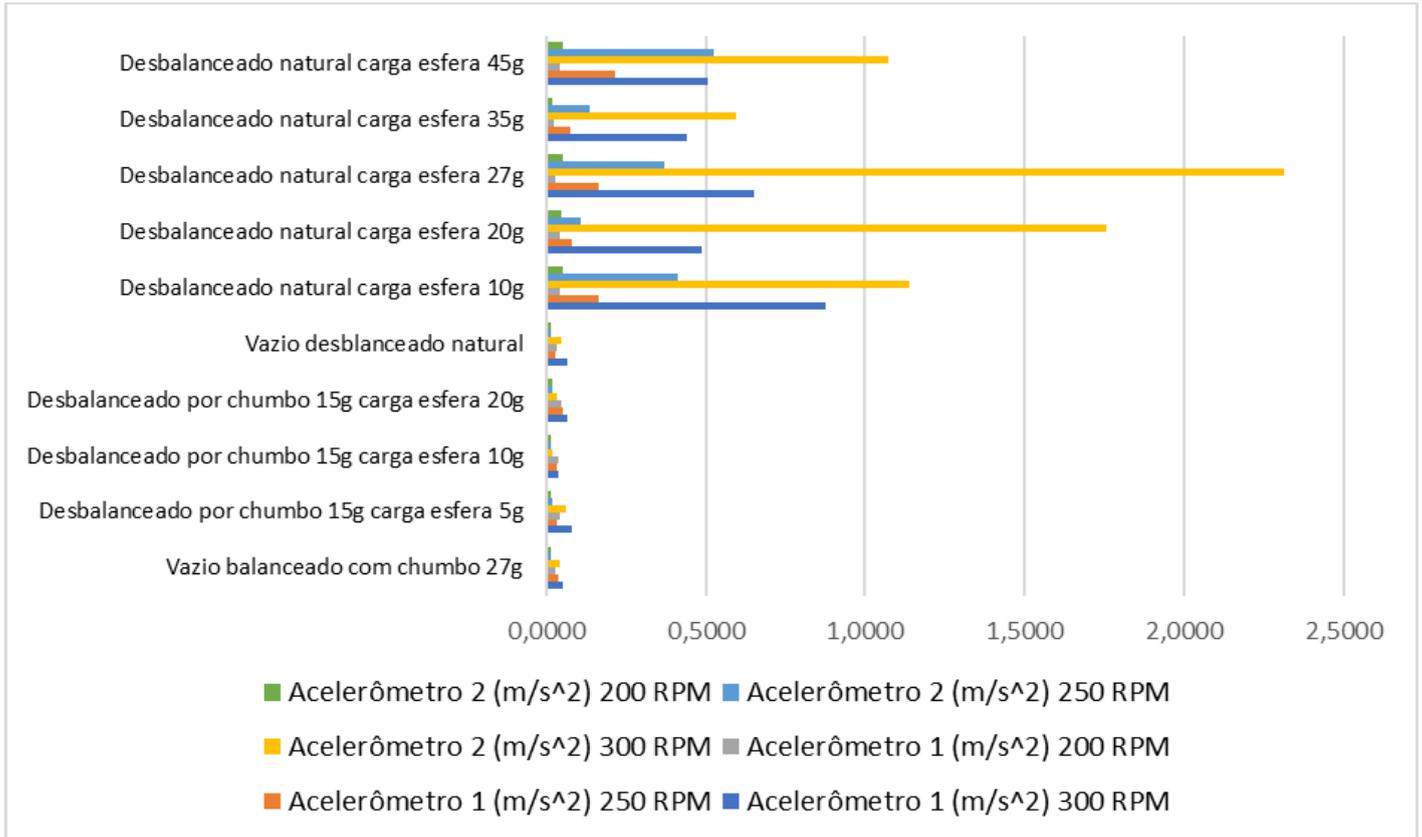


Figura 39: Resultados obtidos através dos valores em RMS do comparativo entre seis condições nos acelerômetros 1 e 2. Fonte: Pesquisa direta (2024).

Na figura 39 é possível observar tanto no acelerômetro 1 como no 2 os maiores valores de aceleração nas condições pneu desbalanceado vazio (PDV), pneu desbalanceado com esferas (PDE 10 a 45g) e pneu desbalanceado por chumbo com adição de esferas (PDE 5 a 20g) em comparação a condição pneu balanceado por chumbo (PBC), indicando assim uma possível ineficiência em balancear um sistema roda pneu, através da introdução de micro esferas de vidro no pneu.

4.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram descritos os resultados obtidos através do experimento feito pela comparação entre dois tipos de balanceamento sendo eles: (instalação de chumbo na roda) e (introdução de microesferas de vidro no pneu). Também foram demonstradas as bases, métodos e variáveis devidamente descritas para a formulação dos resultados obtidos, de forma que fiquem bem claras para uma maior compreensão do leitor.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Ao procurar responder à pergunta problema apresentada no Capítulo 1.

É possível balancear um conjunto roda pneu através da introdução no interior do pneu de micro esferas disponíveis comercialmente ?

Foi possível encontrar as seguintes conclusões:

- Uma bancada experimental para balanceamento foi proposta, construída e testada.
- Foi possível identificar a situação de balanceamento/desbalanceamento convencional na bancada: o desbalanceamento causou níveis de vibrações elevadas e o balanceamento tradicional com inclusão de contrapesos de chumbo foi comprovado pela distribuição aleatória da posição final do movimento da roda e pela redução da vibração.
- Entretanto, não foi possível afirmar que a introdução de microesferas de vidro no sistema roda pneu foi eficiente para realizar o balanceamento do sistema. Tal conclusão foi confirmada a partir do comparativo em cada condição estudada, entre os resultados das acelerações RMS; das amplitudes dos espectros das acelerações e pelos valores de força obtidos através das células de carga.

Há a necessidade de maior investigação para esclarecer se a falta do balanceamento pelas esferas está associado especificamente à bancada desenvolvida ou ao fraco desempenho da solução por si só.

5.2 Recomendações

A partir do estudo realizado, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de uma bancada de estudos de alta rigidez com automatização de instrumentos de leitura de forma a evitar a interferência vibracional causada pela ação humana durante o experimento de balanceamento de um sistema roda pneu através da introdução de microesferas no interior do pneu;
- Desenvolvimento de um conjunto motor/roda de atrito estável dinamicamente, responsável por colocar um sistema roda pneu em movimento;
- Desenvolvimento de uma análise metodológica do sistema de medição e análise de

dados para o estudo do balanceamento através da introdução de microesferas de vidro disponíveis comercialmente no interior desse pneu;

- Desenvolvimento de condições experimentais, para análise do balanceamento de um sistema roda pneu em rotação e translação, através da introdução de microesferas de vidro disponíveis comercialmente no interior desse pneu;
- Criação de um modelamento numérico para o comportamento de microesferas de vidro disponíveis comercialmente no interior de pneu em rotação.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **ISO 2631-1:1997**. Vibrações mecânicas e choque - Avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

Balachandran, B., & Magrab, E. B. (2011). **Vibrações** (2ª ed.). Cengage Learning. ISBN-13: 978-0-534-55206-0. ISBN-10: 0-534-55206-4, 2011.

Cutnell; Kenneth W. Johnson; **Física** tradução André Soares de Azevedo, José Paulo Soares de Azevedo. - 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

Gil, Antônio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. Disponível em: Minha Biblioteca, (7th edição). Grupo GEN, 2022.

Halliday, David, et al. **Fundamentos de Física - Mecânica - Volume 1**. Disponível em: Minha Biblioteca, (12th edição). Grupo GEN, 2022.

Junior, José S. **Introdução às vibrações mecânicas**. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Blucher, 2006.

Lakatos, Eva M. **Técnicas de Pesquisa**. Disponível em: Minha Biblioteca, (9th edição). Grupo GEN, 2021.

Minayo, M. C. de S. **Pesquisa Social: Teoria, Método e Criatividade**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2003.

Nascimento, Luiz Paulo D. **Elaboração de projetos de pesquisa: Monografia, dissertação, tese e estudo de caso, com base em metodologia científica**. Disponível em: Minha Biblioteca, Cengage Learning Brasil, 2012.

Norton, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. McGraw Hill Brasil, 2010.

Rao, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. Revisão técnica de José Juliano de Lima Junior. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

Serway, Raymond, A. e John W. Jewett Jr. **Princípios de Física vol. 1**. Disponível em: Minha Biblioteca, Cengage Learning Brasil, 2014.

Soeiro, N. S.; Melo, G. S. V.; Ohana, G. J. Vibrações e o Corpo Humano: uma avaliação ocupacional, **Acústica e vibrações**, Revista da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC ISSN 1983-442X, Santa Maria, RS, no. 43, p. 53-62, dezembro 2011.

ANEXO A

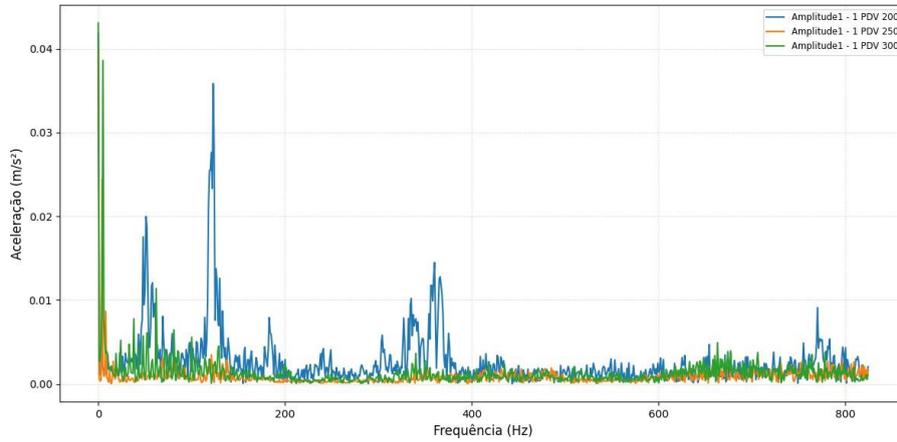


Figura A1 a: Comparativo entre velocidades AC1.

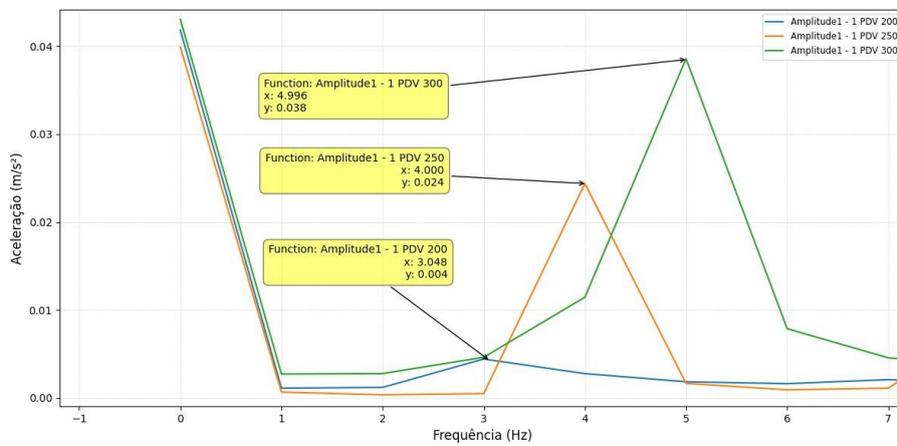


Figura A1 b: Comparativo entre velocidades AC1.

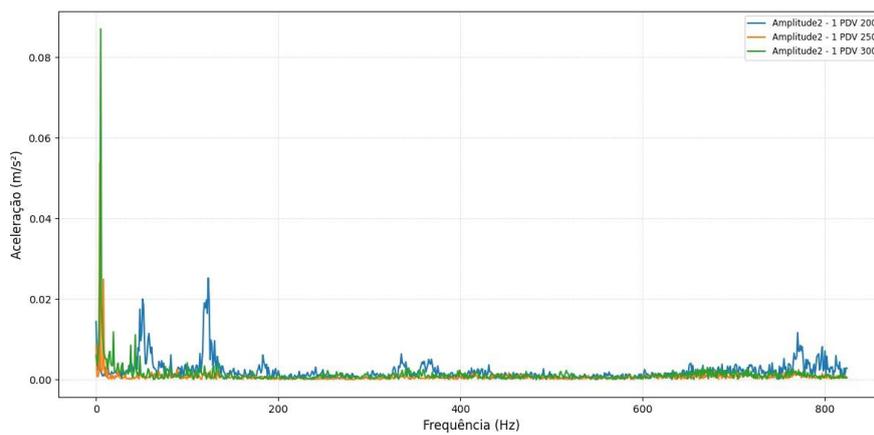


Figura A2 a: Comparativo entre velocidades AC2.

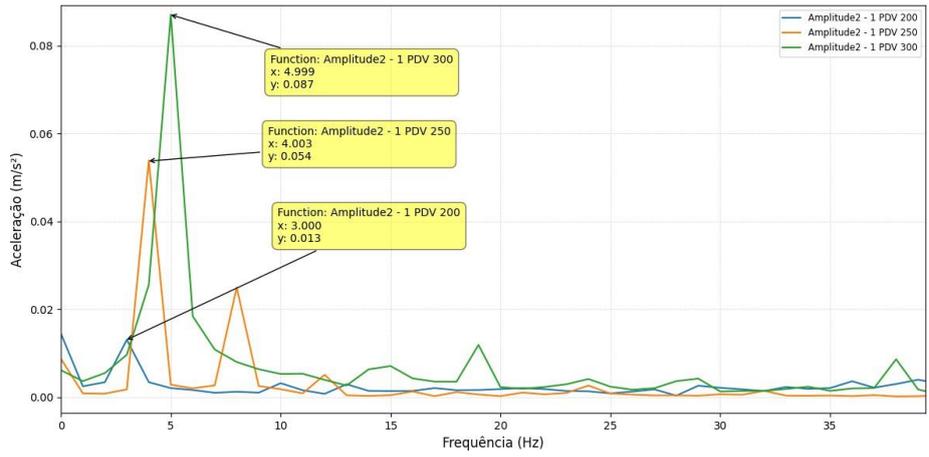


Figura A2 b: Comparativo entre velocidades AC2.

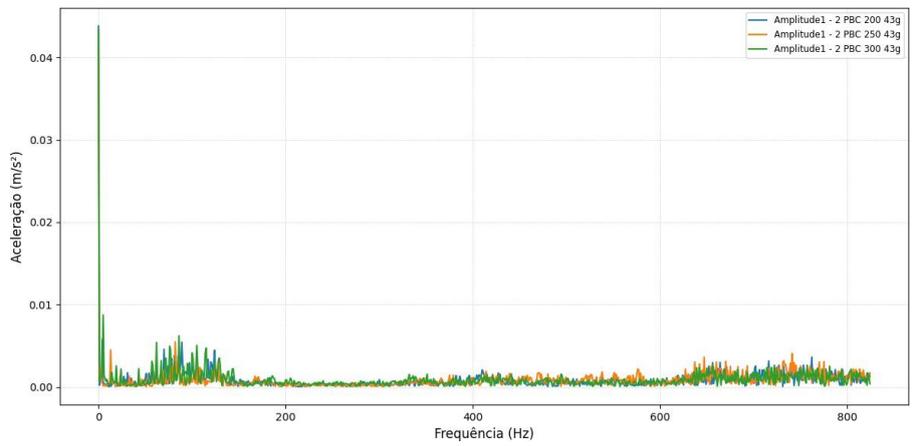


Figura A3 a: Comparativo entre velocidades AC1.

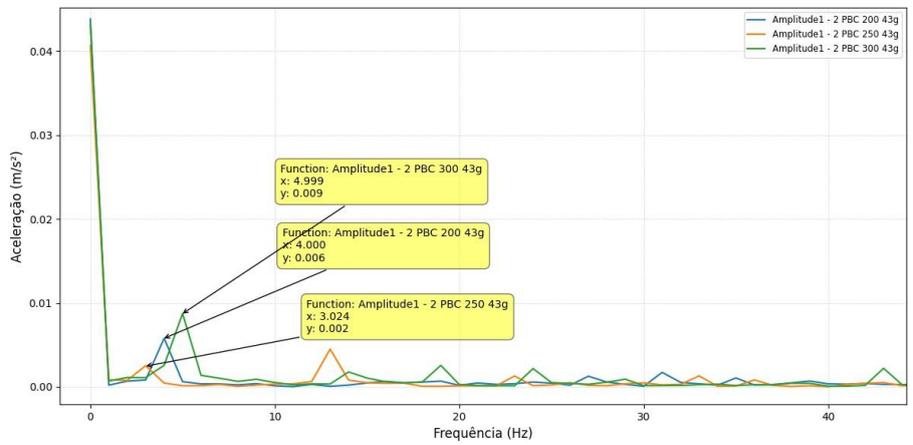


Figura A3 b: Comparativo entre velocidades AC1.

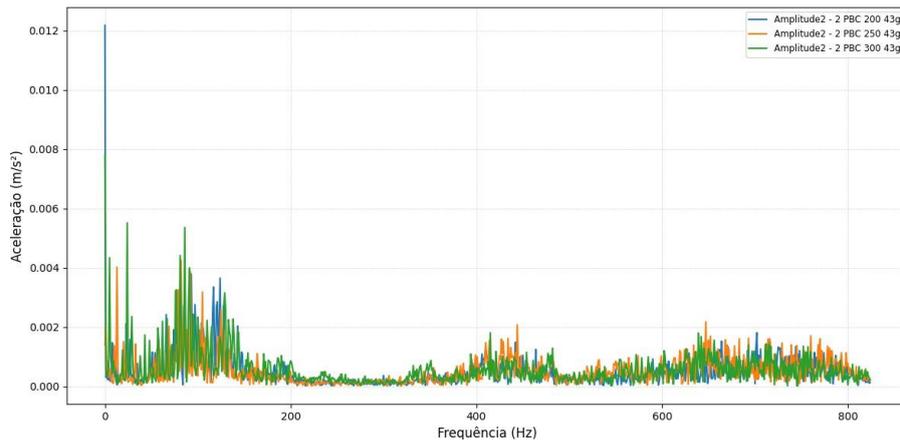


Figura A4 a: Comparativo entre velocidades AC2.

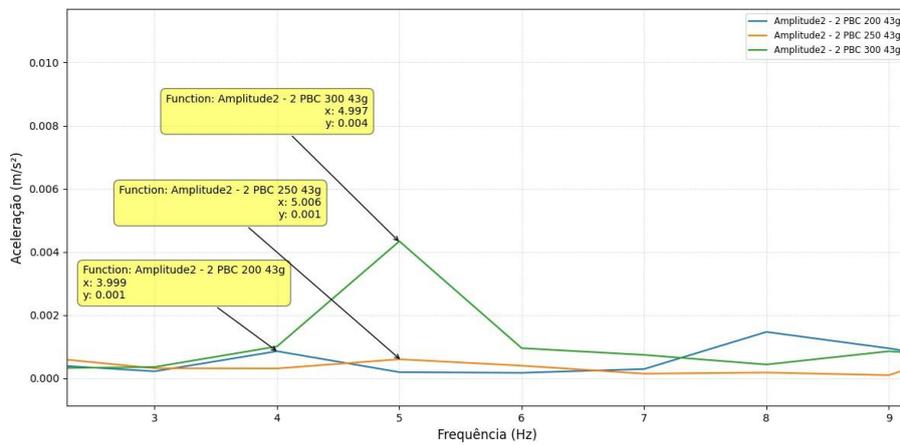


Figura A4 b: Comparativo entre velocidades AC2.

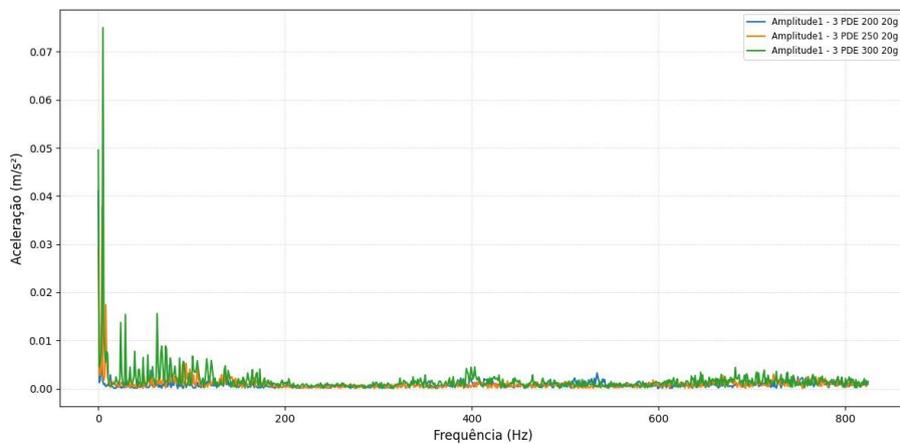


Figura A5 a: Comparativo entre velocidades AC1.

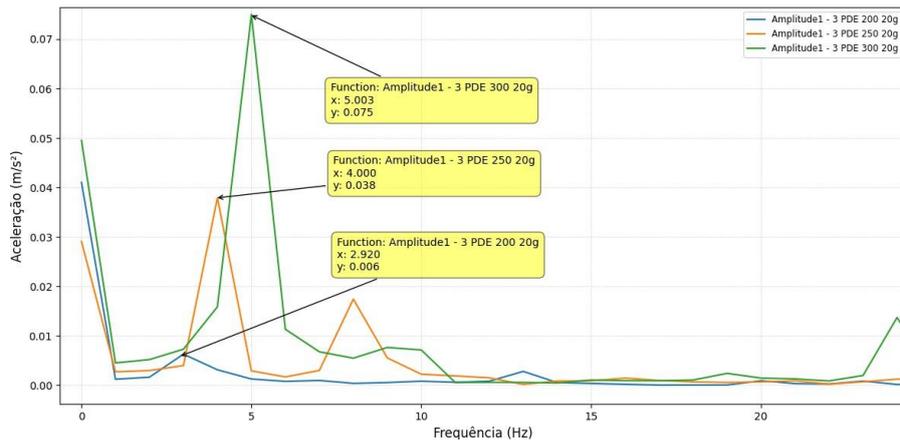


Figura A5 b: Comparativo entre velocidades AC1.

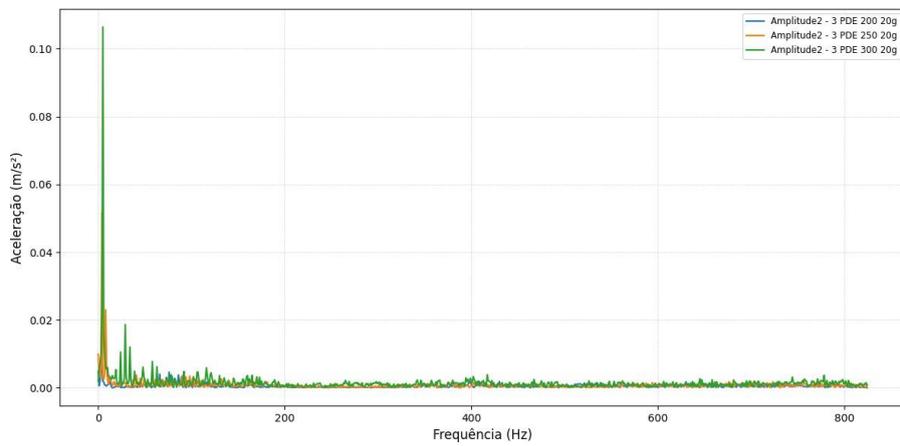


Figura A6 a: Comparativo entre velocidades AC2.

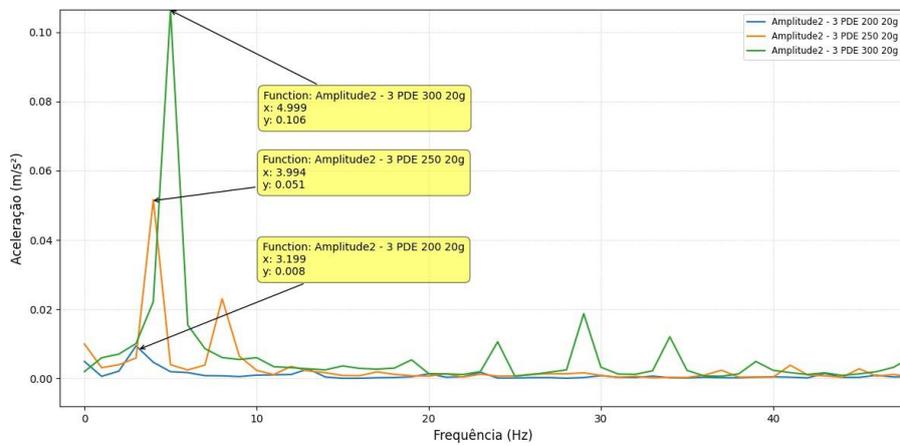


Figura A6 b: Comparativo entre velocidades AC2.

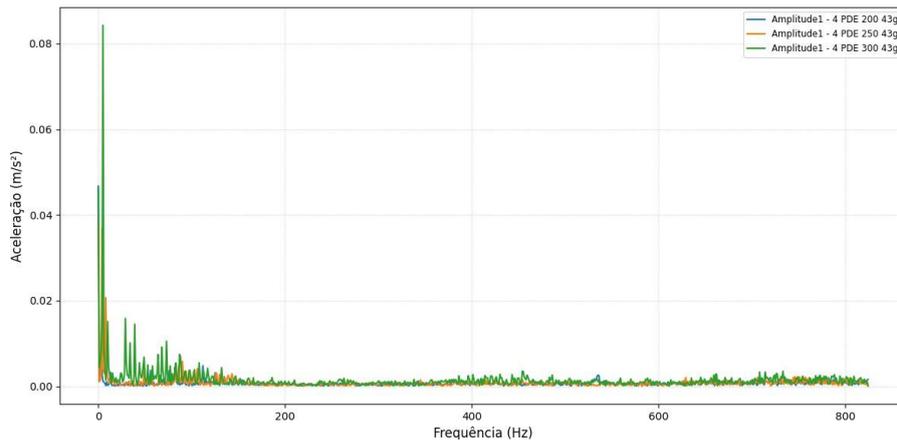


Figura A7 a: Comparativo entre velocidades AC1.

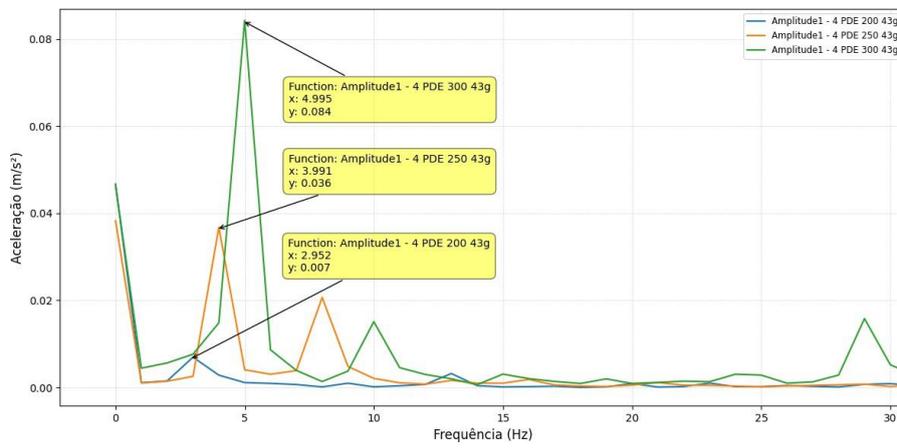


Figura A7 b: Comparativo entre velocidades AC1.

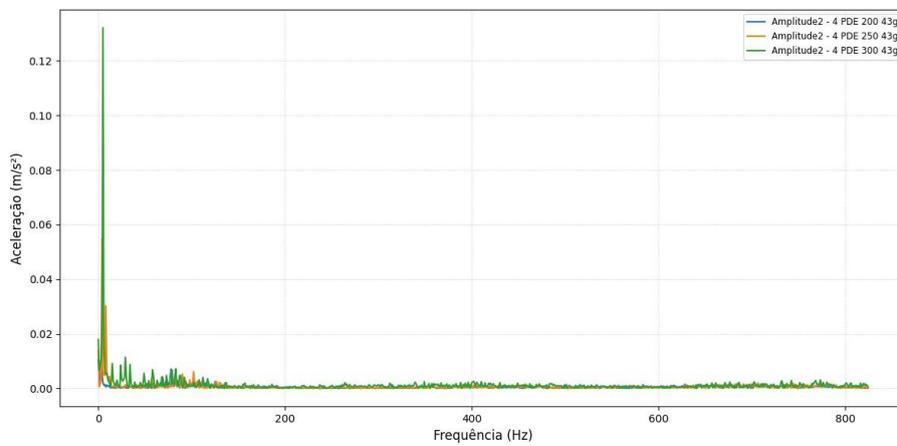


Figura A8 a: Comparativo entre velocidades AC2.

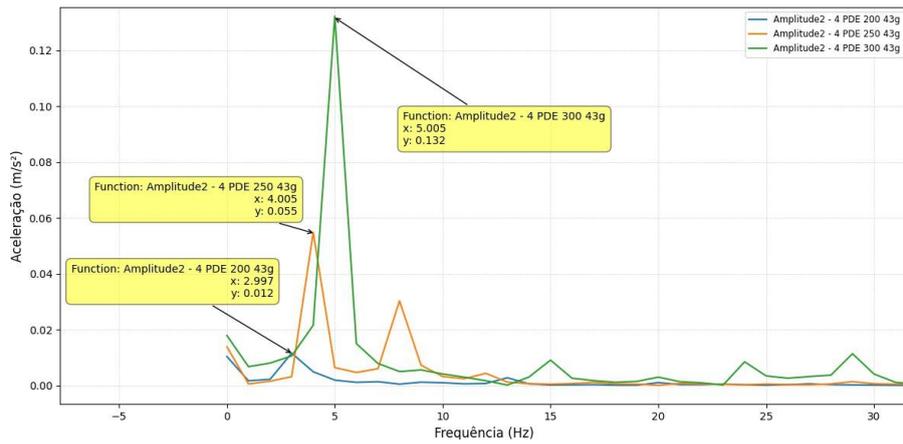


Figura A8 b: Comparativo entre velocidades AC2.

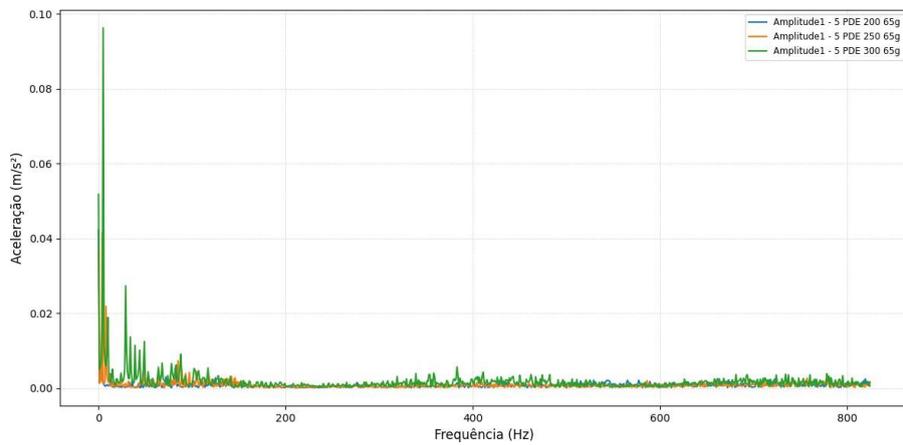


Figura A9 a: Comparativo entre velocidades AC1.

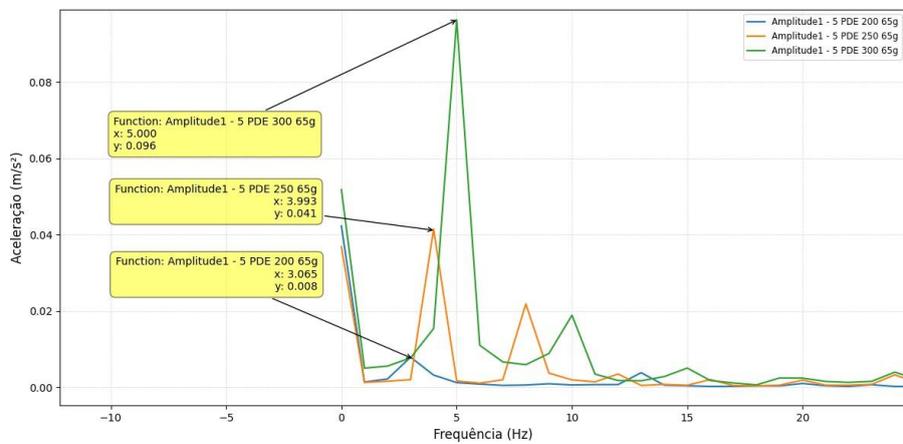


Figura A9 b: Comparativo entre velocidades AC1.

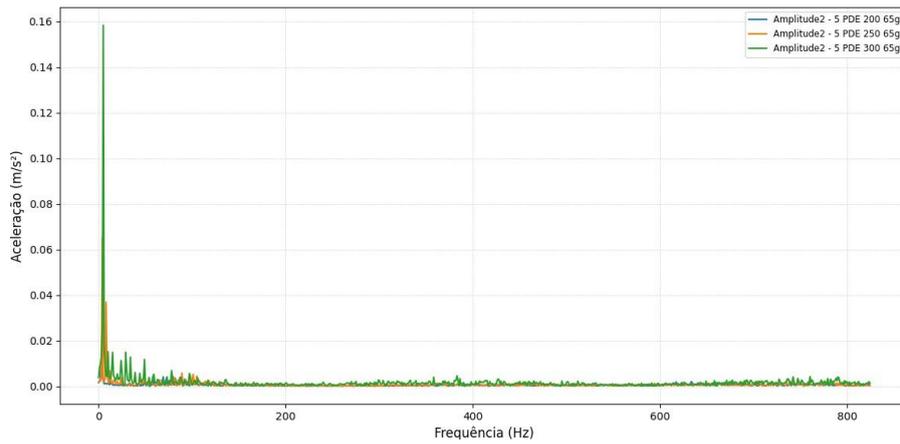


Figura A10 a: Comparativo entre velocidades AC2.

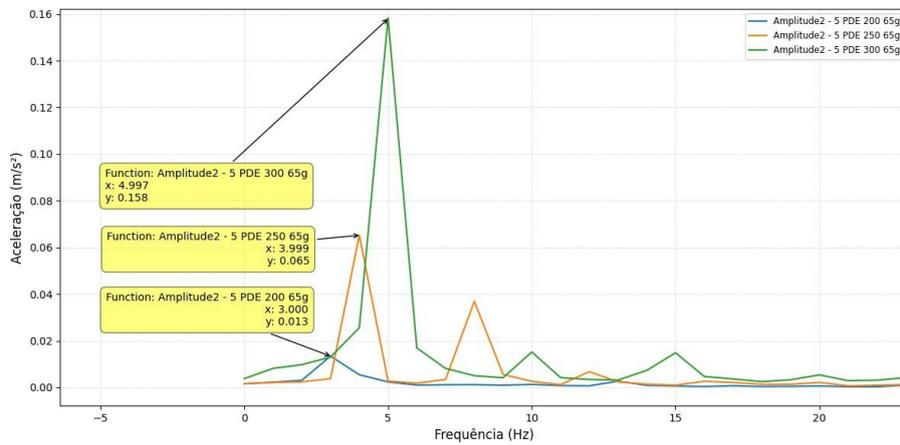


Figura A10 b: Comparativo entre velocidades AC2.

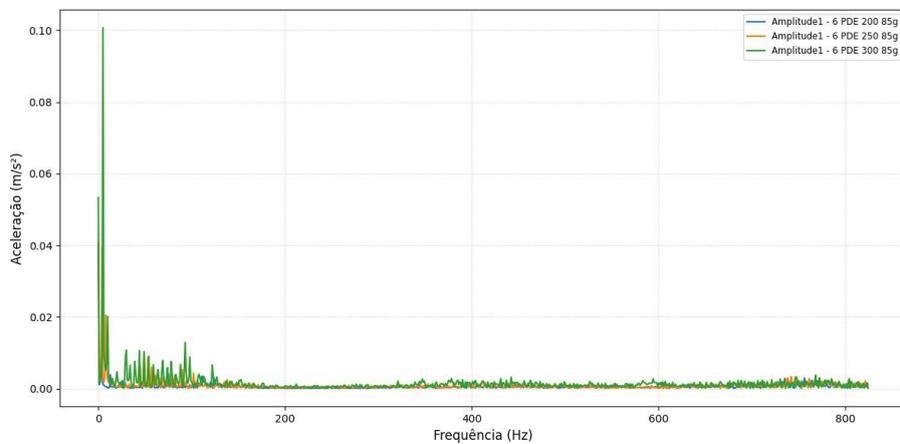


Figura A11 a: Comparativo entre velocidades AC1.

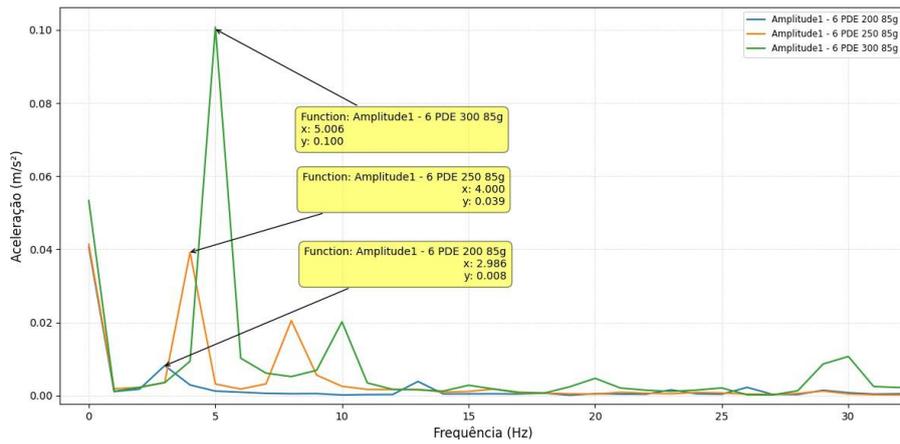


Figura A11 b: Comparativo entre velocidades AC1.

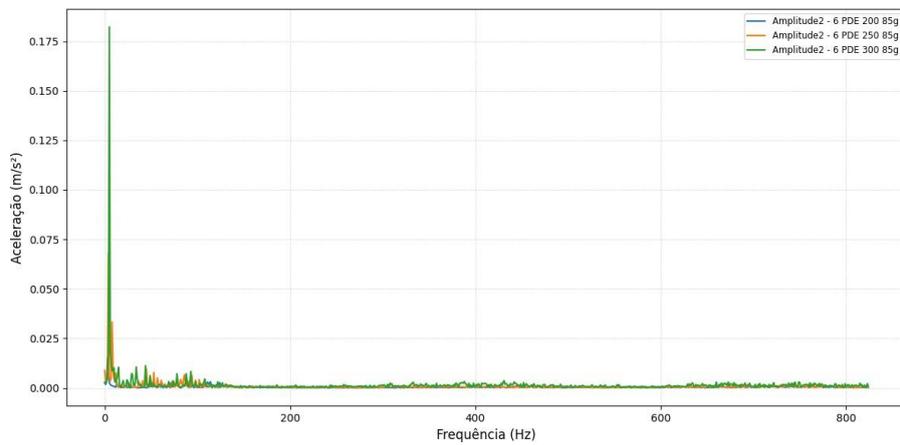


Figura A12 a: Comparativo entre velocidades AC2.

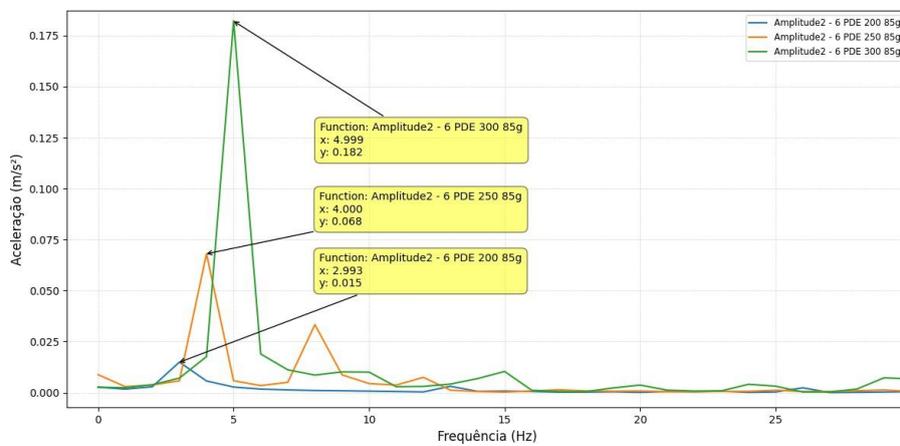


Figura A12 b: Comparativo entre velocidades AC2.

ANEXO B

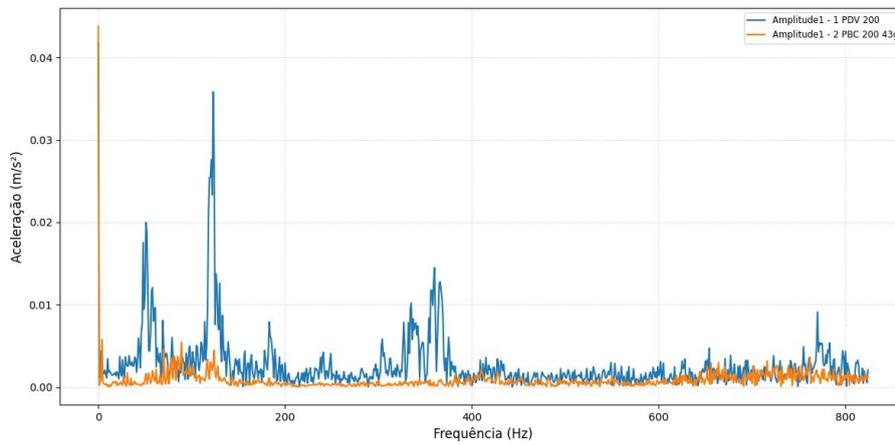


Figura B1 a: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC1 .

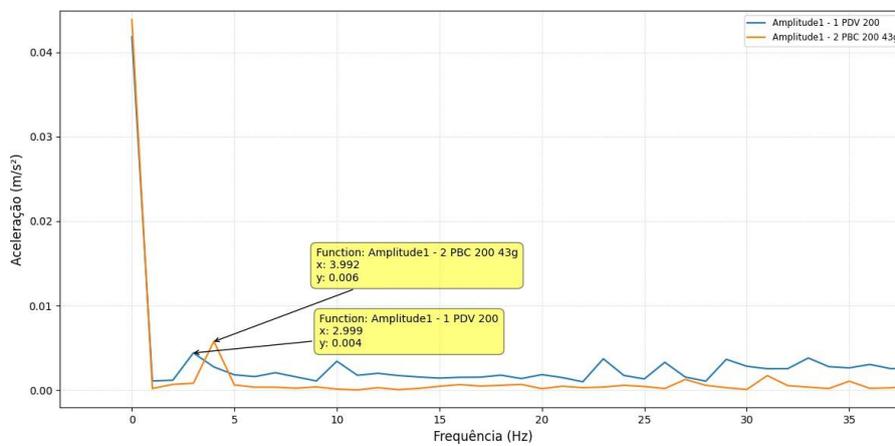


Figura B1 b: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC1 .

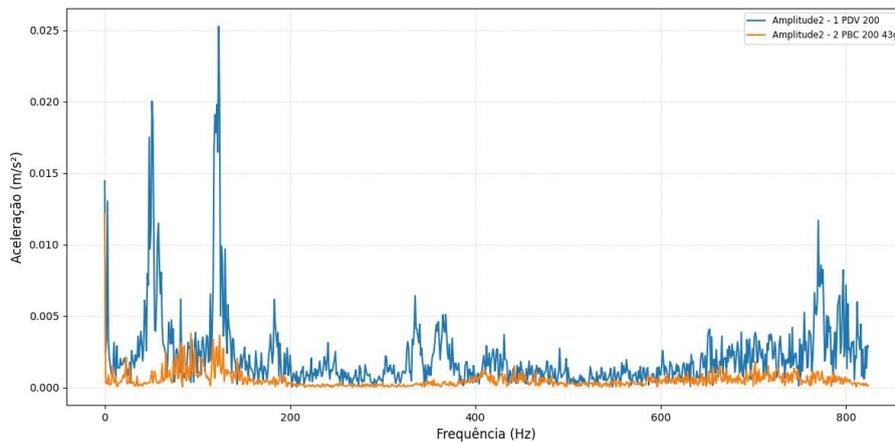


Figura B2 a: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC2 .

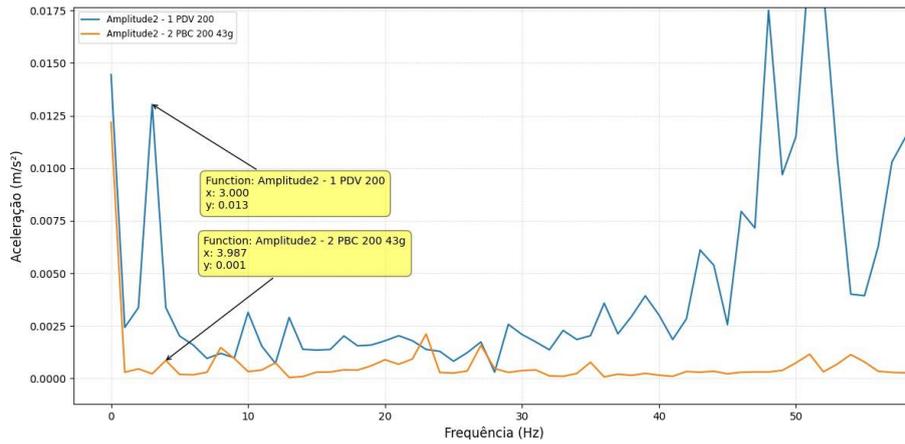


Figura B2 b: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC2 .

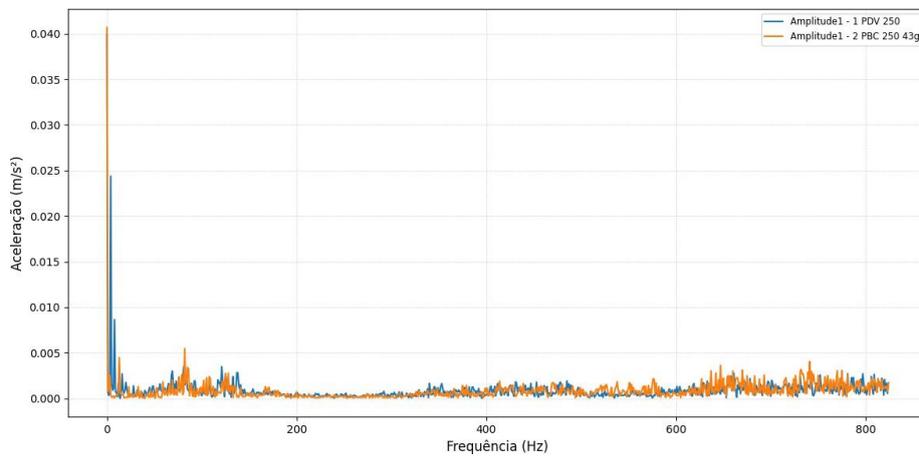


Figura B3 a: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC1 .

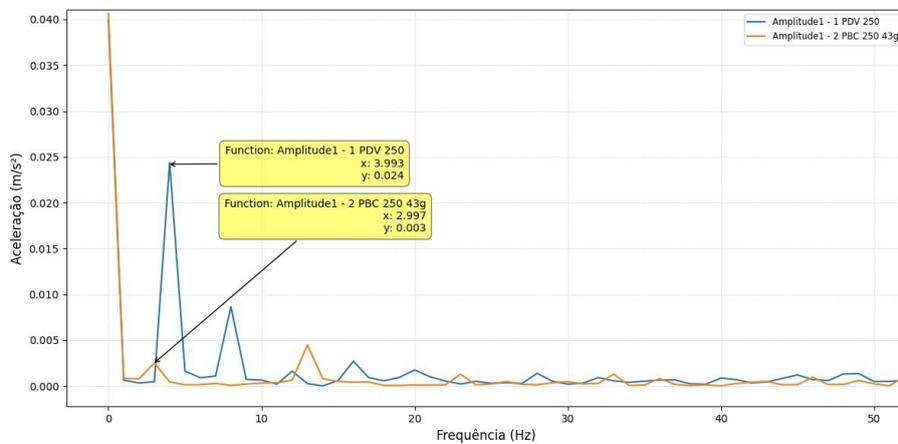


Figura B3 b: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC1 .

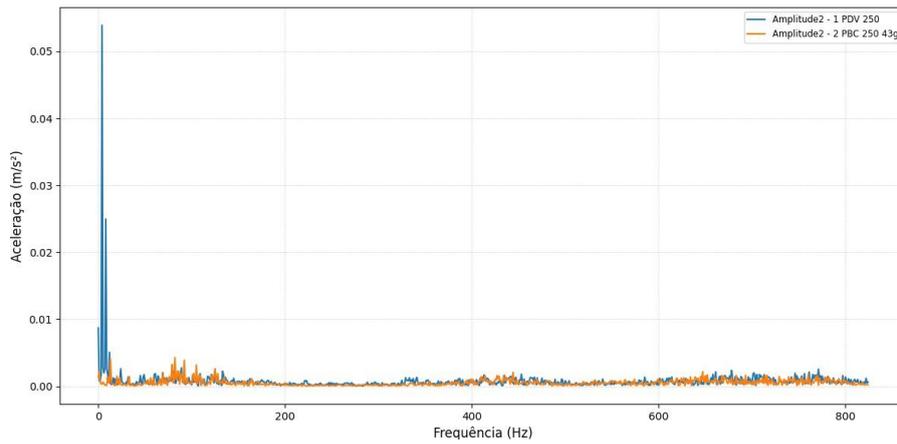


Figura B4 a: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC2 .

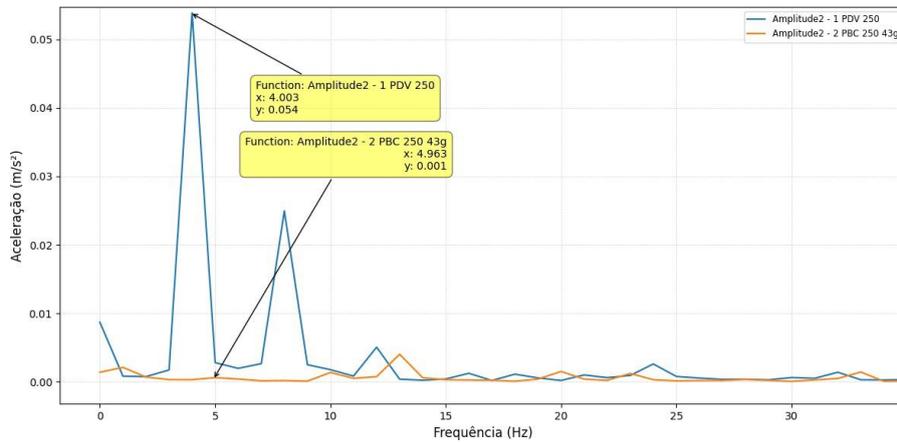


Figura B4 b: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC2 .

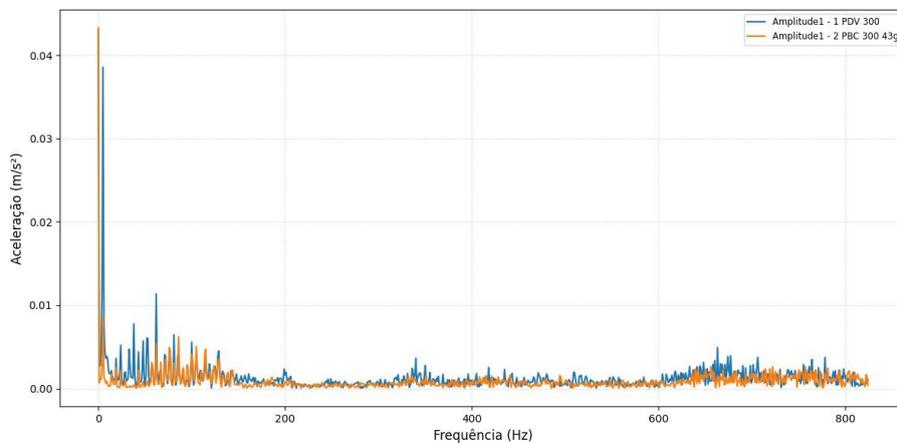


Figura B5 a: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC1 .

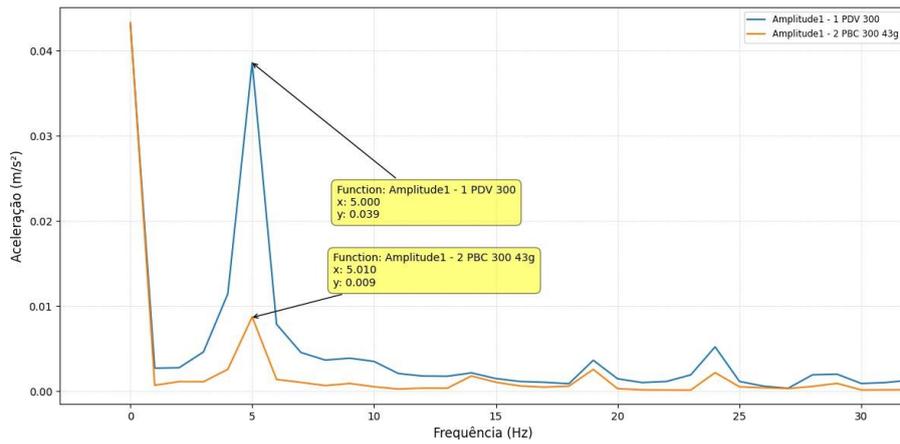


Figura B5 b: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC1 .

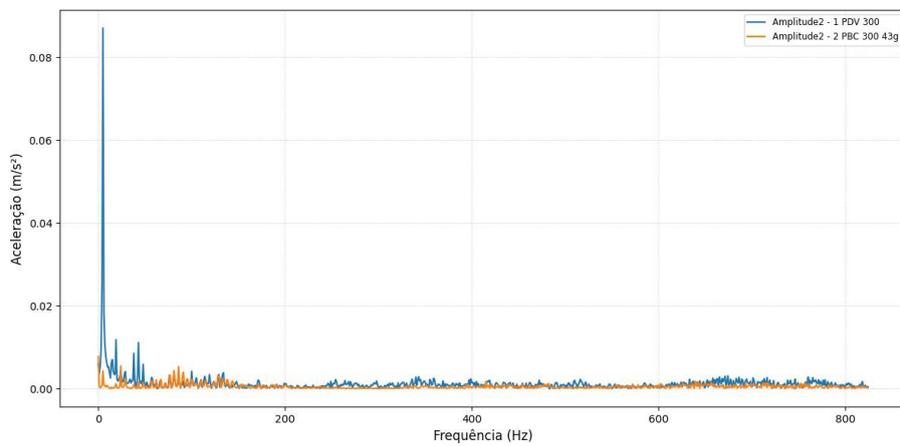


Figura B6 a: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC2 .

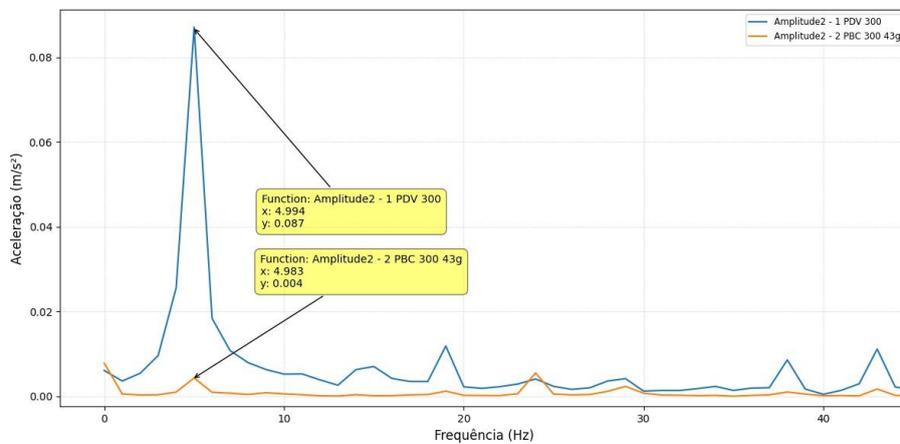


Figura B6 b: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDV para uma mesma rotação.AC2 .

ANEXO C

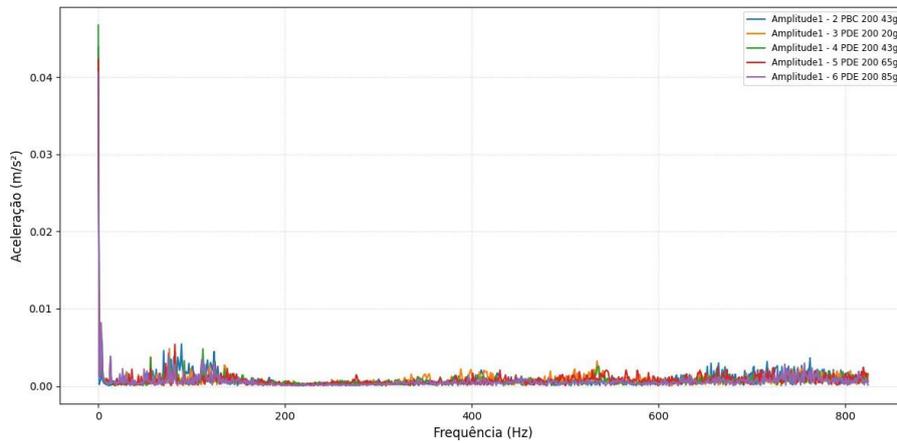


Figura C1 a: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC1.

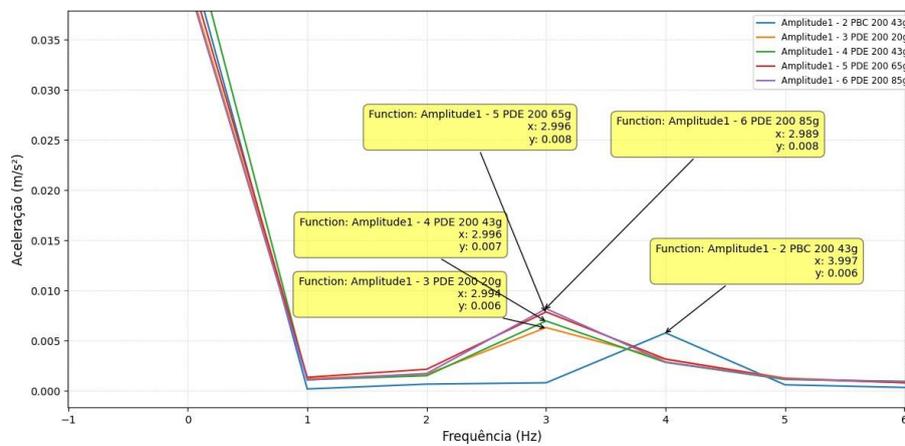


Figura C1 b: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC1.

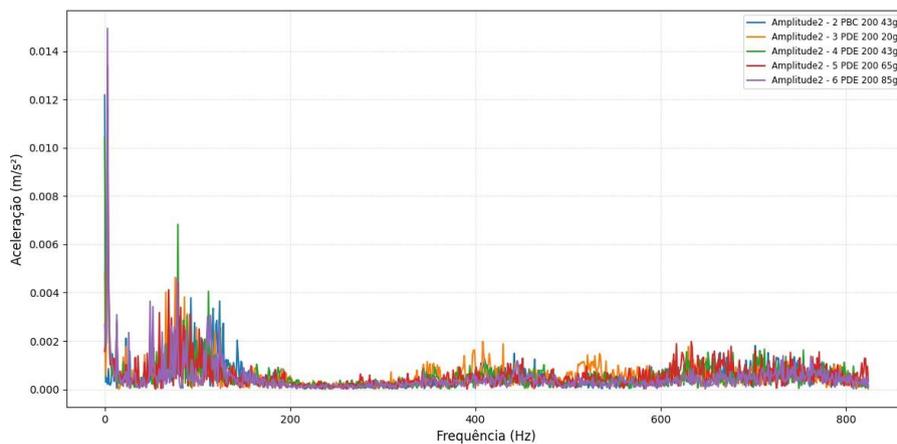


Figura C2 a: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC2.

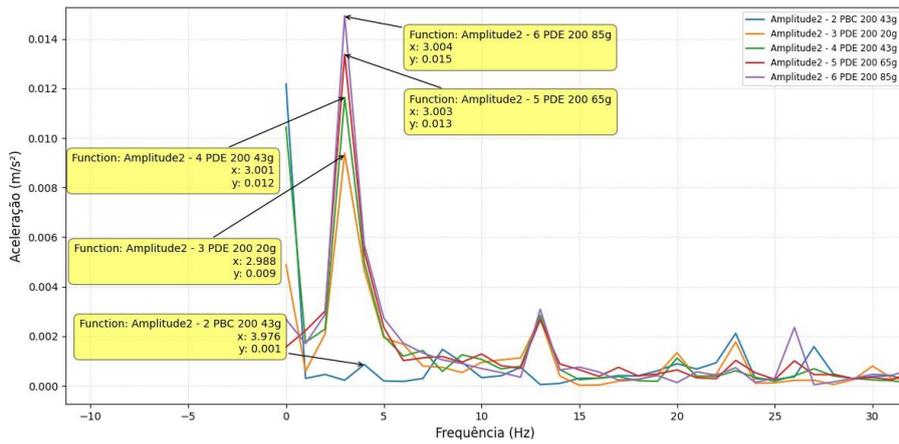


Figura C2 b: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC2.

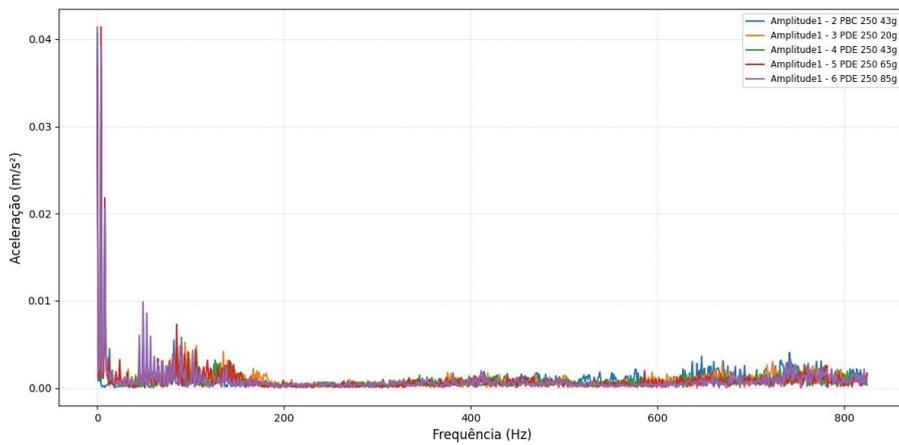


Figura C3 a: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC1.

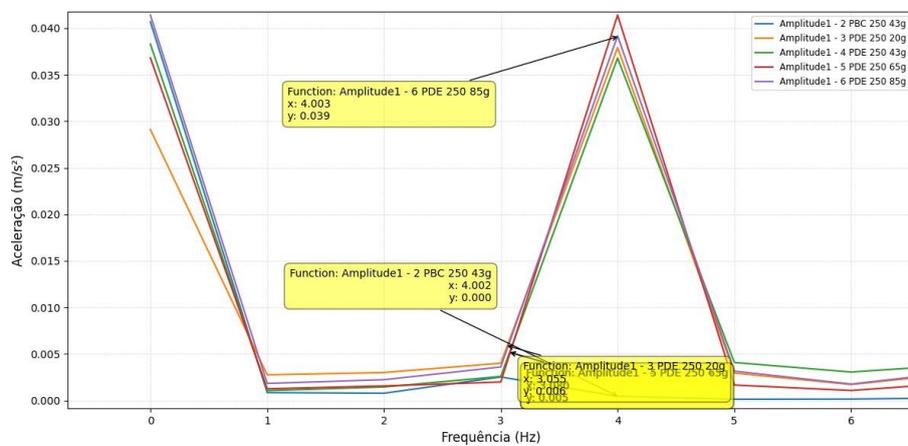


Figura C3 b: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC1.

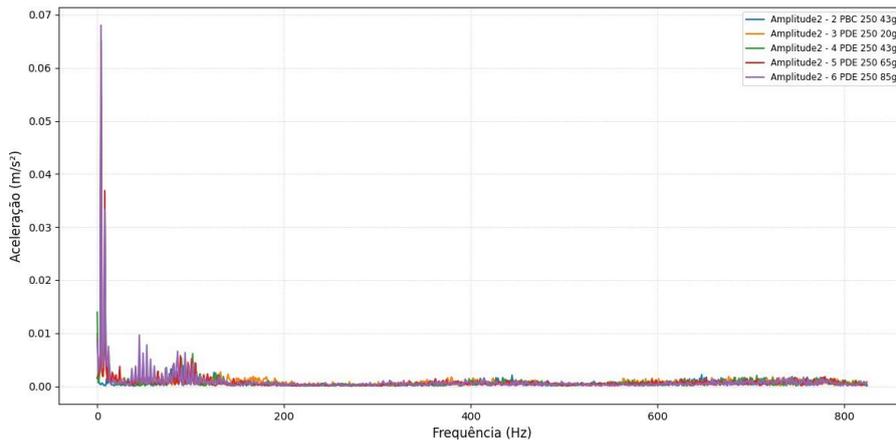


Figura C4 a: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC2.

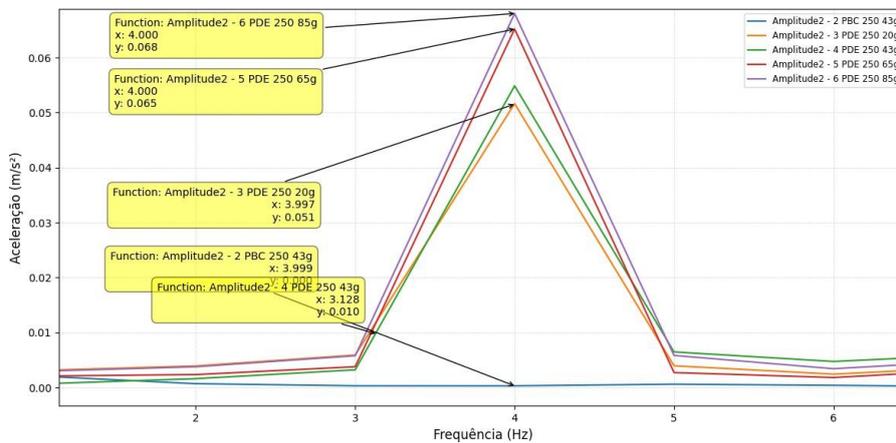


Figura C4 b: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC2.

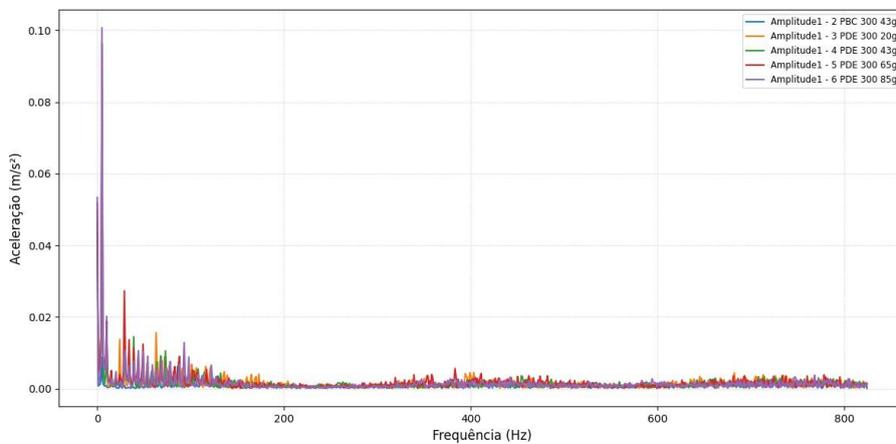


Figura C5 a: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC1.

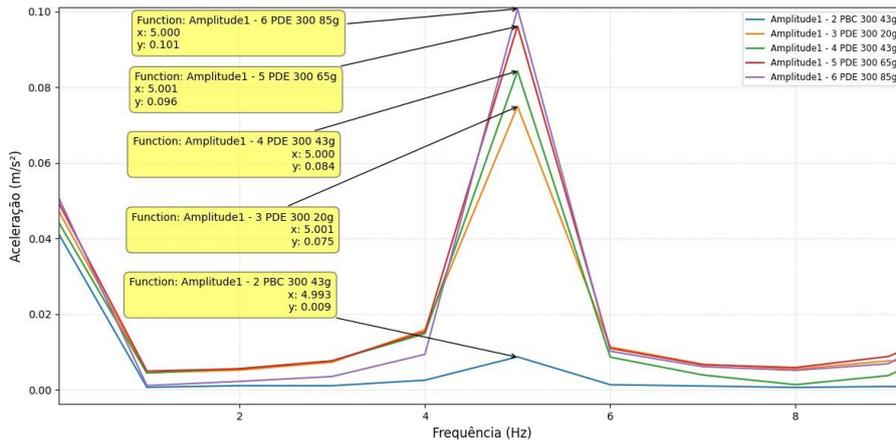


Figura C5 b: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC1 .

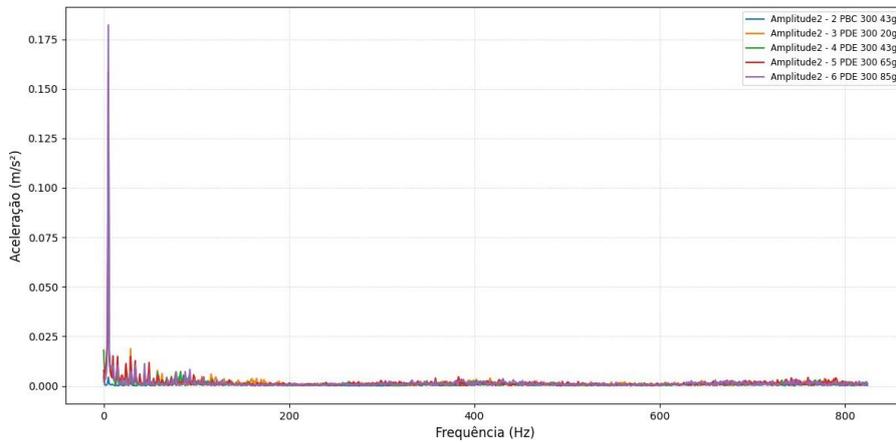


Figura C6 a: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC2 .

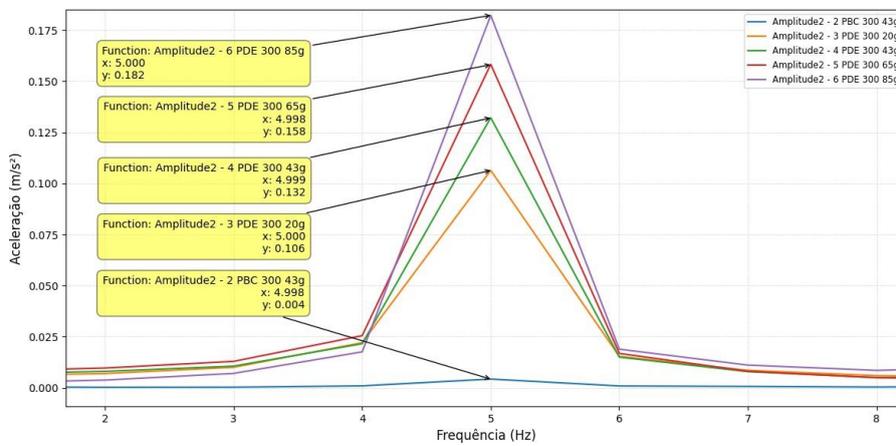


Figura C6 b: Comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 85g para uma mesma rotação AC2 .

gusta

2025-06-21 15:05:20

retirar a página em branco