

Centro Paula Souza
Faculdade de Tecnologia Santo André
Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Automotiva

HEITOR PRESSER FERREIRA DA SILVA

Sistemas de calibração de acelerômetros: estudo da técnica de
calibração utilizando pêndulo de choque

Santo André - SP

2023

HEITOR PRESSER FERREIRA DA SILVA

Sistemas de calibração de acelerômetros: estudo da técnica de calibração utilizando pêndulo de choque

Monografia apresentada ao Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Automotiva da FATEC Santo André, como requisito parcial para conclusão do curso em Tecnologia em Eletrônica Automotiva.

Orientadora: Profa. MSc Suely Midori Aoki.

Santo André - SP

2023

S586s

Silva, Heitor Presser Ferreira da

Sistemas de calibração de acelerômetro: estudo da técnica de calibração utilizando pêndulo de choque / Heitor Presser Ferreira da Silva. - Santo André, 2023. – 89f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2023.

Orientador: Prof.^a Suely Midori Aoki

1. Eletrônica. 2. Calibração. 3. Veículos. 4. Tecnologia. 5. Segurança. 6. Desenvolvimento. 7. Projeto. 8. Pêndulo de choque. II. Sistemas de calibração de acelerômetro: estudo da técnica de calibração utilizando pêndulo de choque.

629.2

HEITOR PRESSER FERREIRA DA SILVA

Sistemas de calibração de acelerômetros: estudo da técnica de calibração utilizando pêndulo de choque

Monografia apresentada ao Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Automotiva da FATEC Santo André, como requisito parcial para conclusão do curso em Tecnologia em Eletrônica Automotiva.

Orientadora: Profa. MSc Suely Midori Aoki

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Presidente da Banca
Profa. MSc Suely Midori Aoki
Fatec Santo André

Primeiro membro da Banca
Prof. MSc José dos Santos Garcia Neto
Vidjaya Automação e Tecnologia

Segundo membro da Banca
Prof. MSc Luis Roberto Kanashiro
Fatec Santo André

Local: Fatec Santo André

Horário: 10h

Data: 24/06/2023

Santo André - SP

2023

Dedico este trabalho a Deus,
minha família, minha namorada
e a todos os meus amigos que
estiveram presentes durante esta
etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família especialmente meus pais Alice Mara Presser e Antonio Ferreira da Silva Sobrinho por terem me ensinado o caminho correto da vida e por terem me dado todo o suporte paternal e financeiro, deixo a minha homenagem, pelo exemplo de vida, por oferecerem todo o suporte para a minha educação, e pela paciência durante a minha dedicação no desenvolvimento deste trabalho e principalmente, por me ajudarem na etapa final do meu curso.

De maneira especial, a nossa orientadora, a Professora Mestra Suely Midori Aoki, por sua paciência, conhecimento compartilhado e comprometimento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos professores Roberto Bortolussi e Fernando Garup Dalbo, pelo apoio no desenvolvimento e aperfeiçoamento deste trabalho.

Em especial agradeço ao amigo que a engenharia me deu Eng. Miguel Ramon Aragon Briaes, excelente profissional que desenhou e confeccionou com excelência o principal item do projeto Agradeço aos demais professores, e funcionários da Fatec Santo André por terem dedicado tanto tempo de suas vidas a minha formação, e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*“É dia de Sol, mas o tempo pode fechar.
A chuva só vem quando tem de molhar
Na vida é preciso aprender, se colhe o bem
que plantar. É Deus quem aponta a estrela
que tem de brilhar.”*

Xande de Pilares

RESUMO

Acelerômetros são usados para medir vibrações, acelerações e deslocamentos transmitidos através de um objeto. Um tipo de acelerômetro, objeto deste estudo, é o acelerômetro de choque que possui várias aplicações na área da engenharia automotiva, em relação à segurança humana, como por exemplo, o teste de impacto automotivo (*crash test*); também possui aplicações no setor aeroespacial, militar, armamento, é usado em testes de quedas, eventos pirotécnicos, estudos explosivos e impactos de projéteis. Para fornecer dados precisos, acelerômetros precisam ser calibrados para garantir que eles cubram a faixa de frequência e a sensibilidade à aceleração corretamente, conforme as especificações do fabricante. Este trabalho aborda uma técnica utilizada para calibrar um acelerômetro de choque. O sistema de calibração referido neste projeto é composto por um pêndulo, dois condicionadores de sinais de acelerômetro, um sistema de aquisição de dados, um acelerômetro padrão de calibração e um notebook. Este projeto tem como base a norma ISO 16063-22:2005 Métodos para calibração de transdutores de vibração e choque — Parte 22: Calibração de choque em comparação com um transdutor de referência. Nesse projeto, foi feita uma abordagem sobre o Teste de Impacto Automotivo e assuntos relacionados a ele, também foi demonstrado o desenvolvimento do sistema de calibração, a medição e os resultados obtidos na calibração do acelerômetro utilizado foram reunidos num exemplo de Certificado de Calibração que é emitido no caso dos acelerômetros que passam neste teste.

Palavras chaves: Calibração. Segurança veicular. Teste de impacto. Acelerômetros.

ABSTRACT

Accelerometers are used to measure vibrations, accelerations and displacements transmitted through an object. One type of accelerometer, object of this study, is the shock accelerometer that has several applications in the area of automotive engineering, in relation to human safety, such as, for example, the automotive impact test (crash test); it also has applications in the aerospace, military, weaponry sector, it is used in drop tests, pyrotechnic events, explosive studies and projectile impacts. To provide accurate data, accelerometers need to be calibrated to ensure they cover the frequency range and acceleration sensitivity correctly as per the manufacturer's specifications. This work addresses a technique used to calibrate a shock accelerometer. The calibration system referred to in this project consists of a pendulum, two accelerometer signal conditioners, a data acquisition system, a standard calibration accelerometer and a notebook. This project is based on ISO 16063-22:2005 Methods for Calibrating Vibration and Shock Transducers — Part 22: Shock Calibration Compared to a Reference Transducer. In this project, an approach was made to the Automotive Impact Test and issues related to it, the development of the calibration system was also demonstrated, the measurement and the results obtained in the calibration of the accelerometer used were gathered in an example of a Certificate of Calibration that is issued for accelerometers that pass this test.

Keywords: Calibration Vehicle safety. Impact test. Accelerometers.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Sistema de Aquisição Digital de Dados | 20 |
| Figura 2 - Hierarquia do Sistema Metrológico..... | 23 |
| Figura 3 – Acelerômetro de choque | 25 |
| Figura 4 - Diagrama esquemático de um acelerômetro de choque | 26 |
| Figura 5 - Diagrama esquemático do calibrador de choque utilizando a técnica da barra Hopkinson..... | 28 |
| Figura 6 – Calibrador de choque com barra Hopkinson | 28 |
| Figura 7 - Diagrama esquemático do calibrador utilizando o método Dropball | 29 |
| Figura 8 - Diagrama esquemático do calibrador de choque pendular | 30 |
| Figura 9 – Detalhamento da área dos transdutores no calibrador de choque pendular | 31 |
| Figura 10 - Diagrama de montagem do sistema de calibração..... | 39 |
| Figura 11 - Gráfico de resposta em frequência do amplificador do acelerômetro padrão | 42 |
| Figura 12 – Gráfico de resposta de ganho e frequência do amplificador de sinais do acelerômetro em calibração | 44 |
| Figura 13 – Medidas da primeira linha da Tabela 6..... | 45 |
| Figura 14 – Medidas da última linha da Tabela 6..... | 46 |
| Figura 15 – Posicionamento do acelerômetro padrão dentro do pêndulo | 48 |
| Figura 16 – Fixação do acelerômetro padrão | 48 |
| Figura 17 – Fixação do cabo no acelerômetro padrão..... | 49 |
| Figura 18 – Posicionamento da tampa na bigorna | 49 |
| Figura 19 – Fixação da tampa na bigorna | 50 |
| Figura 20 – Fixação do conector do acelerômetro sob teste | 50 |
| Figura 21 – Fixação do acelerômetro a ser calibrado..... | 51 |
| Figura 22 – Aplicação de torque sobre o acelerômetro a ser calibrado..... | 51 |
| Figura 23 – Ligação do cabo no acelerômetro a ser calibrado..... | 52 |
| Figura 24 – Posicionamento do cabo conectado ao acelerômetro a ser calibrado | 52 |
| Figura 25 – Fixação dos cabos dos acelerômetros | 53 |
| Figura 26 – Conexão dos acelerômetros nos amplificadores | 53 |
| Figura 27 – Saída dos amplificadores de sinais | 54 |
| Figura 28 – Conexão dos cabos na DAQ | 54 |
| Figura 29 – Conexão da DAQ no notebook | 55 |
| Figura 30 – Configura o dos amplificadores de sinais..... | 55 |
| Figura 31 – Configura o do software de medi o..... | 57 |
| Figura 32 – Visualiza o da tela do notebook | 58 |
| Figura 33 – Configura o do osciloscópio no software | 59 |
| Figura 34 – Transferência de choque para o pêndulo | 60 |
| Figura 35 – Tela do Notebook..... | 61 |
| Figura 36 – Tela do software depois da aquisi o do primeiro choque de meia onda..... | 62 |
| Figura 37 – Medi o da subida do choque de meia onda | 62 |
| Figura 38 – Medi o da descida do choque de meia onda | 63 |
| Figura 39 – Fluxograma do cáculo da sensibilidade | 64 |
| Figura 40 - Certificado de Calibra o | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Critérios de dispositivos e técnicas para a calibração de choque | 25 |
| Tabela 2 – Normas para calibração de sensores de vibração | 31 |
| Tabela 3 – As principais normas para calibração de transdutores de vibração | 32 |
| Tabela 4 – Resposta de ganho e frequência do amplificador de sinais padrão | 41 |
| Tabela 5 – Resposta de ganho e frequência do amplificador de sinais do acelerômetro em calibração | 43 |
| Tabela 6 – Faixa de frequência e aceleração do Pêndulo | 44 |
| Tabela 7 – Dados adquiridos durante a calibração | 64 |
| Tabela 8 – Tabela do calculo de incerteza de medições | 71 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | | |
|-------------------|-------|--|
| ABNT | ----- | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABNT NBR | ---- | Norma Brasileira aprovada pela ABNT |
| BIPM | ----- | Bureau International des Poids et Mesures – França / Bureau Internacional de Pesos e Medidas |
| CMC | ----- | Calibration and Measurement Capabilities / Capacidades de Medição e Calibração |
| Diavi | ----- | Divisão de Acústica e Vibrações |
| Dimci | ----- | Diretoria de Metrologia Científica e Industrial |
| Euro NCAP | ---- | European New Car Assessment Programme |
| FFT | ----- | Fast Fourier Transform / Transformada Rápida de Fourier |
| ICP | ----- | Circuito Piezoelétrico Integrado / Integrated Circuit Piezoelectric |
| IEPE | ----- | Eletrônica Piezoelétrica Integrada / Integrated Electronics Piezo Electric |
| Inmetro | ----- | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| ISO | ----- | International Organization for Standardization, Genebra |
| Latin NCAP | ---- | Latin New Car Assessment Programme |
| Lavib | ----- | Laboratório de Vibrações do Inmetro |
| NIST | ----- | National Institute of Standards and Technology / EUA (antigo NBS) |
| NMI | ----- | National Metrology Institute / Instituto Nacional de Metrologia |
| NMS | ----- | National Measurement Standards / Padrões Nacionais de Medição |
| RMO | ----- | Regional Metrology Organization / Organismos Regionais de Metrologia |
| SI | ----- | International System of Units / Sistema Internacional de Unidades |
| USB | ----- | Barramento serial universal / Universal Serial Bus |
| VIM | ----- | Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| | 1.1 Objetivo..... | 16 |
| | 1.2 Motivação | 16 |
| | 1.3 O problema..... | 17 |
| 2 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 18 |
| | 2.1 Teste de impacto automotivo | 18 |
| | 2.2 Classificação dos testes de segurança incluídos no teste de impacto..... | 18 |
| | 2.3 Sistema de aquisição de dados | 19 |
| | 2.3.1 Sensores (transdutores)..... | 20 |
| | 2.3.2 Condicionamento de sinal | 20 |
| | 2.3.3 Conversor analógico para digital | 21 |
| | 2.3.4 Software de medição e computador..... | 22 |
| | 2.4 Rastreabilidade e hierarquia metrológica [2]..... | 22 |
| | 2.4.1 Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)..... | 23 |
| | 2.4.2 Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM):..... | 23 |
| | 2.4.3 Laboratórios de Calibração Acreditados: | 23 |
| | 2.4.4 Laboratórios de Calibração e Ensaio Rastreáveis: | 24 |
| | 2.4.5 Usuários Finais: | 24 |
| | 2.5 Métodos de calibração | 24 |
| | 2.5.1 Métodos de calibração de choque..... | 24 |
| | 2.5.2 Método Dropball..... | 29 |
| | 2.5.3 Método de pendulo | 30 |
| | 2.5.4 Principais normas utilizadas para calibração de transdutores de vibração..... | 31 |
| 3 | MATERIAIS UTILIZADOS | 33 |
| | 3.1 Notebook..... | 33 |
| | 3.2 Sistema de Aquisição de Dados..... | 34 |
| | 3.3 Acelerômetro Padrão Endevco | 35 |

| | | | |
|---|-------|--|-----------|
| | 3.4 | Acelerômetro em calibração | 35 |
| | 3.5 | Amplificador de sinais do acelerômetro padrão | 36 |
| | 3.6 | Amplificador de sinais do acelerômetro em calibração..... | 38 |
| | 3.7 | Pêndulo | 38 |
| | 3.8 | Cabos Utilizados..... | 38 |
| 4 | | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 39 |
| | 4.1 | Sistema de Calibração | 39 |
| | 4.2 | Estudo do sistema e rastreabilidade..... | 40 |
| | 4.2.1 | Resposta de ganho e frequência dos amplificadores utilizados..... | 40 |
| | 4.2.2 | Análise da aceleração e tempo de impacto gerado pelo pendulo | 44 |
| | 4.3 | Calibração do acelerômetro | 46 |
| | 4.3.1 | Ajuste do ganho dos amplificadores..... | 56 |
| | 4.3.2 | Configuração do software de medição (osciloscópio)..... | 56 |
| | 4.3.3 | Geração do choque no pêndulo..... | 60 |
| 5 | | RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS DADOS | 62 |
| | 5.1 | Análise dos pulsos obtidos com o choque..... | 62 |
| | 5.2 | Análise das acelerações e durações de pulso preferidas..... | 63 |
| | 5.3 | Cálculo da sensibilidade do acelerômetro | 64 |
| | 5.4 | Certificado de calibração | 65 |
| | 5.5 | Incerteza de medição | 68 |
| | 5.5.1 | Descrição dos componentes da incerteza | 68 |
| 6 | | CONCLUSÃO..... | 72 |
| 7 | | PROPOSTAS FUTURAS | 73 |
| | | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 74 |
| | | Apêndice A – Croqui do Pêndulo | 76 |
| | | Anexo A - Condições de incerteza para calibração de choque secundário..... | 81 |
| | | Anexo B - Cálculo da sensibilidade ao choque para calibradores de choque de bigorna | 82 |
| | | Anexo C - Certificado de Calibração do acelerômetro padrão..... | 87 |

1 INTRODUÇÃO

O acelerômetro desempenha um papel crucial na proteção e monitoramento de uma máquina ou estrutura de uma planta. Essas medições ajudam no controle dos sistemas de controle do processo e fazem ajustes em um ambiente de processo. Esses sensores podem ser encontrados em todos os lugares, incluindo laboratórios aeroespaciais, testes automotivos, até estruturas inteligentes que fornecem sistemas de monitoramento de condições e controle ativo. Mas, como garantir que o valor real do processo seja medido pelo sensor e repassado para processamento?

Durante o ciclo de vida de um acelerômetro, seja no momento da fabricação ou em um teste, ele deve ser calibrado para obter a melhor precisão possível. Sem calibração adequada com um padrão de aceleração conhecido, a saída elétrica de um acelerômetro não pode ser verificada e confiável. Erros na medição de vibração também podem ocorrer devido a desgaste mecânico ou danos ao sensor.

A calibração envolve descobrir o desvio entre a leitura verdadeira e a leitura exibida. É o procedimento de comparação da saída do sensor com um valor de referência ou padrão de alta precisão. Na verdade, a maioria dos fabricantes de acelerômetros fornecem os períodos de calibração recomendados nas especificações de seus produtos.

Para fornecer dados precisos, os acelerômetros são calibrados para garantir que cubram a faixa de frequência correta e que sua sensibilidade à aceleração seja classificada corretamente.

Trazendo o acelerômetro para o mundo automotivo, sabemos que o automóvel proporciona grande comodidade e rapidez para a vida das pessoas e contribui muito para a economia e o desenvolvimento social. No entanto, com o rápido desenvolvimento da indústria automotiva, os acidentes rodoviários também aumentaram repentinamente, resultando em um grande número de vítimas e perdas econômicas. De acordo com a Forbes Advisor USA [5], os acidentes automobilísticos são anualmente responsáveis por aproximadamente 1,3 milhão de mortes no mundo, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS). Nos Estados Unidos, os projetos da National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) estimam que houve 42.915 mortes no trânsito em 2021, um aumento de 10,5% em relação a 2020 e o maior aumento percentual anual na história do Fatality Analysis Reporting System, o que significa que uma pessoa é morta em acidentes de trânsito a cada 25 segundos em escala global. Os acidentes de trânsito são a principal causa de morte na população de 15 a 29 anos. A China, o

país mais populoso do mundo, teve um total de 187.781 acidentes de trânsito em 2015 . O total de perdas diretas de propriedade causadas pelo acidente foi de 103.692 milhões de yuans, dos quais o número total de feridos foi de 199.880 e o número de mortos foi de 58.022. Todos esses números chocantes indicam que melhorar a proteção da segurança dos ocupantes e reduzir as baixas causadas por acidentes de trânsito tornaram-se uma questão importante a ser resolvida com urgência.

De fato, já na década de 1950, a fim de investigar as lesões humanas causadas por colisões e avaliar corretamente as lesões reais sofridas pelos ocupantes em colisões de carros, os pesquisadores começaram a estudar a biomecânica das lesões dos ocupantes em colisões de carros. Os pesquisadores usaram cadáveres humanos como substitutos para coletar dados sobre lesões humanas causadas por acidentes em experimentos de acidentes e, posteriormente, adotaram animais e voluntários como substitutos de acidentes. Embora esses experimentos fornecessem dados valiosos para a segurança de colisões, eles foram gradualmente abandonados devido a restrições como restrições éticas e morais, diferenças de funções fisiológicas, riscos experimentais e irreprodutibilidade experimental. Com o desenvolvimento da ciência e da tecnologia, surgiu o dispositivo de detecção de colisão - manequim de teste de colisão mecânico, conhecido como dispositivo de teste antropométrico (ATD). Quando o manequim é submetido a grandezas físicas como força, aceleração e velocidade durante um acidente de carro, a curva de resposta mecânica deve ser altamente ajustada aos dados obtidos em experimentos com cadáveres humanos. Usando o manequim de teste de colisão para realizar testes de colisão repetidos, a localização da lesão pode ser efetivamente prevista e os indicadores de lesão dos ocupantes podem ser estimados.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo de trazer conhecimentos gerais sobre como são feitos os testes de segurança veicular e demonstrar como é feito e o funcionamento de um sistema de calibração de acelerômetros, pelo método de choque utilizando um pendulo mecânico conforme a norma ISO 16063-22:2005 Métodos para calibração de transdutores de vibração e choque — Parte 22: Calibração de choque em comparação com um transdutor de referência. utilizando equipamentos de medição altamente confiáveis que são diariamente utilizados na indústria automotiva, mostrando todo o processo de calibração e a validação dos resultados.

1.2 Motivação

A motivação desse trabalho veio da oportunidade de trazer a disseminação do conhecimento adquirido com mais de dez anos trabalhando na área de calibração de vibrações e acústica e na segurança veicular. Este assunto vem crescendo com o avanço da tecnologia e segundo o LATIN NCAP, o intuito de estimular os fabricantes a melhorarem o desempenho em segurança de seus veículos à venda na região da América Latina e Incentivar os governos da América Latina e do Caribe a aplicarem as regulamentações exigidas pelas Nações Unidas quanto aos testes de colisão para os veículos de passageiros são os seus maiores objetivos.

Assim, com este trabalho acreditamos que estamos trabalhando para que as leis e normas estejam cada vez mais voltadas para a evolução da segurança humana na área automotiva, trazendo a conscientização da população e desenvolvendo a melhoria da segurança na condução de veículos automotores como um todo.

1.3 O problema

Ao abordar a calibração e as aplicações do acelerômetro, é crucial considerar o custo das falhas. Se uma medição for realizada e posteriormente for constatado que o sensor estava com defeito ou o valor da sensibilidade calculada estava incorreto, há um custo envolvido na invalidação dos dados, sua recaptura ou mesmo a repetição dos testes de medição, se possível. As consequências dessa situação podem variar amplamente. Por exemplo, em um experimento de aprendizado em um curso de medições, o custo de refazer os dados pode ser insignificante. No entanto, quando se trata de um protótipo que requer investimentos significativos, como dezenas de milhões de reais, o custo financeiro de manter esse protótipo por mais tempo é relevante. Em setores como testes em estruturas aeroespaciais, testes de impacto automotivo ou fabricação de aeronaves, os custos podem ser extraordinários e podem até mesmo envolver riscos para a vida dos usuários finais.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Teste de impacto automotivo

O teste de impacto automotivo é um procedimento utilizado para avaliar a segurança de veículos em caso de colisões. Esses testes são conduzidos por institutos de segurança automotiva e organizações regulatórias em todo o mundo para determinar a capacidade de um veículo em proteger seus ocupantes em diferentes tipos de acidentes.

Existem diferentes tipos de testes de impacto, sendo os mais comuns o teste de colisão frontal, o teste de colisão lateral e o teste de colisão de poste. No teste de colisão frontal, o veículo é impactado frontalmente a uma velocidade pré-determinada para simular uma colisão com outro veículo. No teste de colisão lateral, o veículo é atingido lateralmente por outro veículo para simular um acidente em um cruzamento, por exemplo. Já o teste de colisão de poste avalia a resistência do veículo quando atinge um poste ou árvore.

Durante os testes, sensores e instrumentação são utilizados para medir a desaceleração, a deformação da estrutura do veículo e os níveis de força exercidos sobre os dummies (manequins que simulam ocupantes). Com base nos resultados desses testes, os veículos recebem classificações de segurança, como as estrelas nos sistemas de classificação, indicando seu desempenho em proteção aos ocupantes em diferentes cenários de colisão.

Os testes de impacto automotivo desempenham um papel importante na melhoria da segurança dos veículos, estimulando os fabricantes a projetar e produzir carros mais seguros para os ocupantes e outros usuários da estrada.

2.2 Classificação dos testes de segurança incluídos no teste de impacto

Existem várias classificações de segurança utilizadas nos testes de impacto automotivo. A seguir, as classificações mais utilizadas:

- Euro NCAP (European New Car Assessment Programme): O Euro NCAP utiliza um sistema de classificação baseado em estrelas, variando de 0 a 5 estrelas. Quanto maior o número de estrelas, melhor é o desempenho do veículo em termos de segurança.
- NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration): A NHTSA dos Estados Unidos utiliza uma classificação baseada em estrelas, variando de 1 a 5 estrelas. Essa classificação leva em consideração a segurança dos ocupantes adultos, a segurança dos ocupantes infantis, a segurança nos testes de colisão lateral e a resistência do teto

em caso de capotamento.

- IIHS (Insurance Institute for Highway Safety): O IIHS atribui diferentes classificações de segurança, como "Bom", "Aceitável", "Médio" ou "Fraco", com base no desempenho do veículo em testes de colisão frontal, colisão lateral, proteção contra capotamento e eficácia dos sistemas de prevenção de colisão.

Essas são apenas algumas das classificações de segurança utilizadas nos testes de impacto automotivo. Cada país ou região pode ter seus próprios sistemas de classificação e critérios específicos. É importante verificar as classificações e avaliações de segurança do veículo de interesse com base nos padrões aplicáveis à sua localização.

2.3 Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados é um processo essencial para coletar informações sobre as condições físicas do mundo real. Consiste em amostrar sinais que representam essas condições e convertê-los em valores numéricos digitais que podem ser processados e analisados por um computador ou software.

Os sistemas de aquisição de dados, também conhecidos como DAS (Data Acquisition System), DAQ (Data Acquisition) ou DAU (Data Acquisition Unit), desempenham um papel importante nesse processo. Eles são responsáveis por converter os sinais analógicos provenientes de sensores ou transdutores em valores digitais para posterior análise, monitoramento, testes ou medições.

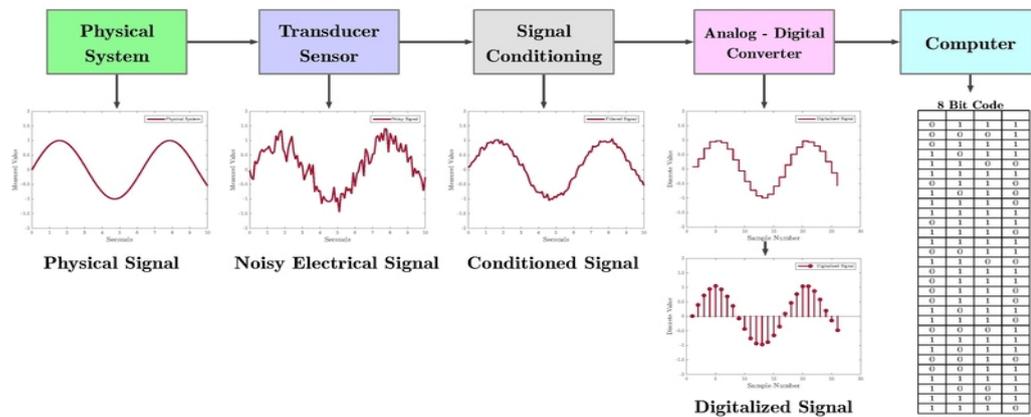
Os componentes fundamentais de um sistema de aquisição de dados incluem:

- Sensores ou transdutores: São dispositivos que convertem medidas físicas, como temperatura, pressão, umidade, movimento, entre outras, em sinais elétricos proporcionais.
- Condicionadores de sinais: São circuitos ou equipamentos que amplificam, filtram ou ajustam os sinais elétricos obtidos dos sensores. Esses condicionadores garantem que os sinais estejam em uma faixa adequada e sejam adequados para conversão analógico-digital.
- Conversores analógico-digitais (ADC): São responsáveis por converter os sinais analógicos provenientes dos condicionadores em valores digitais. Esses conversores realizam uma amostragem do sinal em intervalos regulares e atribuem valores digitais correspondentes a cada ponto de amostra.

- Computador: É necessário um computador que execute um software específico de aquisição de dados (DAQ) para controlar o sistema, coletar, armazenar e analisar os valores digitais obtidos pelos conversores. O software permite a visualização dos dados em tempo real, configuração de parâmetros de aquisição e aplicação de análises.

No conjunto, esses componentes formam um sistema de aquisição de dados completo (Figura 1), que possibilita a coleta precisa e confiável de informações do mundo real, viabilizando sua posterior utilização em diversas aplicações, como pesquisa científica, monitoramento de processos industriais, desenvolvimento de produtos, entre outros.

Figura 1 - Sistema de Aquisição Digital de Dados



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Data_acquisition acessado em 28/05/23

2.3.1 Sensores (transdutores)

Os sensores, também conhecidos como transdutores, são dispositivos responsáveis por converter grandezas físicas, como temperatura, força e movimento, em sinais elétricos, como tensão ou corrente, que podem ser utilizados como entradas para o conversor analógico-digital (ADC).

Existem diferentes tipos de sensores disponíveis, como termopares, termistores, RTDs (Resistência Térmica Detetora) para medição de temperatura, acelerômetros para medição de aceleração e células de carga para medição de força. Para escolher o sensor adequado para o sistema de medição é importante considerar fatores como precisão do sensor e a necessidade de condicionamento de sinal para garantir que o sinal adquirido seja legível e confiável.

2.3.2 Condicionamento de sinal

Para realizar medições de qualidade, é comum a necessidade de circuitos adicionais

entre o transdutor e o conversor analógico-digital. Esse conjunto de circuitos é conhecido como condicionamento de sinal e pode envolver etapas como amplificação/atenuação, filtragem, conclusão da ponte de Wheatstone, fornecimento de tensão para o sensor, linearização, calibração e compensação de junção fria (CJC). Cada tipo de sensor tem requisitos específicos de condicionamento de sinal. Por exemplo, um acelerômetro piezoresistivo requer uma excitação de 5V, conclusão da ponte de Wheatstone e, às vezes, filtros de corte de frequência. Acelerômetros que geram sinais na faixa de milivolts precisam passar por amplificação e filtragem antes de serem convertidos e adquiridos pelo hardware de aquisição de dados.

Geralmente, o circuito de condicionamento de sinal está incorporado em um dispositivo de aquisição de dados, mas também pode fazer parte do próprio transdutor. Por exemplo, células de carga incluem a conclusão da ponte, circuito de calibração e amplificação. Muitos sensores MEMs (microeletromecânicos) também possuem condicionamento de sinal integrado em sua estrutura.

Assim, o condicionamento de sinal desempenha um papel crucial na preparação dos sinais provenientes dos transdutores para que sejam adequados ao processamento pelo conversor analógico-digital e ao subsequente sistema de aquisição de dados.

2.3.3 Conversor analógico para digital

Em todos os sistemas de aquisição de dados, há um componente essencial chamado conversor analógico para digital (ADC). Esse chip tem a função de receber os dados provenientes do ambiente e convertê-los em níveis discretos que podem ser interpretados por um computador. Esses níveis discretos representam a menor alteração detectável no sinal sendo medido. Quanto maior for o número de "bits" de um ADC (por exemplo, 12 bits, 16 bits, 18 bits), maior será a quantidade de níveis discretos que podem representar um sinal analógico e, portanto, maior será a resolução do ADC.

A resolução de um ADC é similar às marcações presentes em uma régua de medição. Uma régua com marcações em milímetros possui uma resolução maior do que uma régua com marcações em centímetros. A escolha entre marcações em milímetros ou centímetros depende da natureza daquilo que está sendo medido - o mesmo princípio se aplica à resolução do ADC. Portanto, a resolução do ADC é um fator determinante para a precisão e detalhamento das medições realizadas. Quanto maior a resolução, mais detalhada será a representação digital do sinal analógico, permitindo uma análise mais precisa dos dados adquiridos.

2.3.4 Software de medição e computador

O software é um componente crucial e igualmente importante no sistema de aquisição de dados. Por meio dele, podemos ajustar os parâmetros de medição, como a gravação e aquisição de sinais em um determinado período, filtragem de sinais desejados e indesejados, e análise dos dados obtidos. Além disso, muitos softwares nos permitem gerar relatórios e conclusões sobre as medições e testes realizados. É por meio do software instalado em um computador que conseguimos visualizar e analisar os dados adquiridos durante os testes ou pesquisas executadas com o sistema de aquisição de dados. Essa interface nos oferece uma representação visual dos dados, permitindo uma compreensão mais clara e detalhada das informações coletadas.

Dessa forma, o software desempenha um papel fundamental na interpretação e utilização dos dados obtidos pelo sistema de aquisição de dados, fornecendo recursos essenciais para análise, relatórios e conclusões sobre as medições realizadas.

2.4 Rastreabilidade e hierarquia metrológica [2]

A rastreabilidade de laboratórios é a capacidade de vincular as medições e os resultados obtidos por um laboratório a padrões de referência reconhecidos internacionalmente. É um requisito fundamental para garantir a confiabilidade e a qualidade dos resultados de medição.

A rastreabilidade estabelece uma cadeia ininterrupta de comparações, onde os resultados de medição são relacionados a um padrão de referência nacional ou internacionalmente reconhecido. Isso significa que o laboratório pode demonstrar que suas medições são confiáveis e podem ser comparadas com outras medições realizadas em diferentes laboratórios. Para estabelecer a rastreabilidade, os laboratórios devem calibrar seus instrumentos de medição usando padrões de referência comprovados. Esses padrões devem ser rastreáveis a padrões superiores e, eventualmente, a padrões internacionais.

A cadeia de rastreabilidade é estabelecida por meio de certificados de calibração que documentam as comparações e os procedimentos utilizados. A rastreabilidade é essencial em diversas áreas, como saúde, segurança, comércio, meio ambiente, pesquisa científica e controle de qualidade industrial. Ela fornece confiança aos clientes, reguladores e partes interessadas de que os resultados de medição são precisos, consistentes e comparáveis.

Além disso, a rastreabilidade desempenha um papel importante na garantia da conformidade com as normas e regulamentos, bem como na participação em programas de proficiência e reconhecimento internacional. Os laboratórios devem documentar e manter

registros adequados para demonstrar a rastreabilidade de suas medições e resultados.

Figura 2 - Hierarquia do Sistema Metrológico



Fonte: <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/estrutura.asp> acessado em 28/05/23

A cadeia de metrologia de calibração no Brasil segue uma estrutura hierárquica (Figura 2) que envolve diferentes níveis de laboratórios e instituições responsáveis por estabelecer e manter os padrões de referência.

A rastreabilidade metrológica é um requisito fundamental em todos os níveis, garantindo a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados de medição.

Segue-se uma descrição geral da cadeia de metrologia de calibração no Brasil.

2.4.1 Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)

O INMETRO é a instituição responsável pela metrologia legal e científica no Brasil. Ele estabelece e mantém os padrões nacionais de medida e é responsável por promover a rastreabilidade metrológica em todo o país.

2.4.2 Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM):

Os Laboratórios Nacionais de Metrologia são os responsáveis pela manutenção dos padrões primários de medida em diversas áreas, como tempo e frequência, eletricidade, temperatura, pressão, entre outras. Esses laboratórios são vinculados ao INMETRO e são responsáveis por garantir a rastreabilidade metrológica no país. Os resultados dos LNMs são reconhecidos como referência nacional e internacional.

2.4.3 Laboratórios de Calibração Acreditados:

Os laboratórios de calibração são acreditados pela Coordenação Geral de Acreditação

(CGCRE) para realizar a calibração de instrumentos e equipamentos de medição em conformidade com as normas técnicas e requisitos de qualidade estabelecidos. Esses laboratórios seguem procedimentos padronizados e possuem competência técnica comprovada. Eles recebem acreditação após avaliação e auditoria realizadas pela (CGCRE) junto ao INMETRO.

2.4.4 Laboratórios de Calibração e Ensaio Rastreáveis:

Além dos laboratórios acreditados, existem outros laboratórios de calibração e ensaios que atuam no país. Embora não sejam acreditados, esses laboratórios podem realizar serviços de calibração e ensaios, desde que os resultados sejam rastreáveis a padrões reconhecidos. Eles podem ser utilizados para atender a demandas específicas ou quando a acreditação não é um requisito obrigatório.

2.4.5 Usuários Finais:

Os usuários finais são as organizações e empresas que utilizam os serviços de calibração para garantir a qualidade e a confiabilidade de suas medições. Eles enviam seus instrumentos e equipamentos de medição aos laboratórios de calibração para verificação e ajuste, quando necessário. Os usuários finais devem escolher laboratórios acreditados ou que possuam rastreabilidade metrológica adequada para garantir resultados confiáveis.

2.5 Metodos de calibração

A calibração de instrumentos e dispositivos [3] se faz necessária para assegurar que os resultados das medições obtidas sejam confiáveis e fidedignas, seguindo métodos específicos que serão descritos resumidamente a seguir.

2.5.1 Métodos de calibração de choque

A norma ISO 16063 - Parte 22 [4] aborda o tema da calibração de choque por comparação com um transdutor de referência. Essa forma de calibração é considerada um método especializado.

A calibração de choque envolve o uso de dispositivos e métodos específicos, dependendo da magnitude desejada para a aceleração de choque e da largura de pulso do evento.

A escolha dos dispositivos e métodos adequados é determinada de acordo com critérios

estabelecidos, como indicado na Tabela 1:

Tabela 1 – Critérios de dispositivos e técnicas para a calibração de choque

| Dispositivo de choque | Pico de aceleração (km/s ²) ^d | Mínima Duração de pulso (ms) |
|-----------------------|--|------------------------------|
| Pendulo | 1.5 | 3 |
| Dropball | 100 | 0.100 |
| Pistao pneumatico | 100 | 0.100 |
| Barra de Hopkinson | 100c | 0.050 |

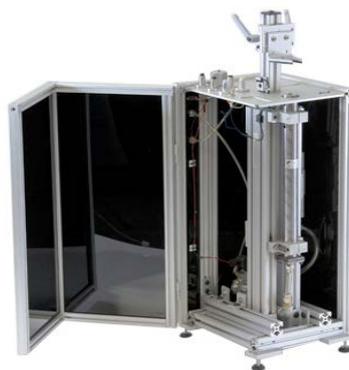
Fonte: [4]

As variações nos valores de pico e duração podem estar em uma faixa de +/-10%. A duração do pulso é medida como sendo 10% do valor de pico. É importante ressaltar que acelerações maiores (valores de pico) e durações de pulso mais curtas podem ser alcançadas, mas sem referência a metodologias primárias. Por exemplo, um valor de 100 km/s² é aproximadamente igual a 10.000 gn. A norma explica o mecanismo básico de cada aparelho e os vários métodos de aquisição e processamento de dados.

A. Pistão pneumático

A calibração de choque comercial mais comumente utilizada na faixa de 0,1 km/s² (~10 g) a 100 km/s² (~10.000 g) é realizada por meio de um aparelho excitado pneumaticamente (Figura 3).

Figura 3 – Acelerômetro de choque



Fonte: <https://www.modalshop.com/calibration/learn/accelerometers/dc-response-accelerometers>

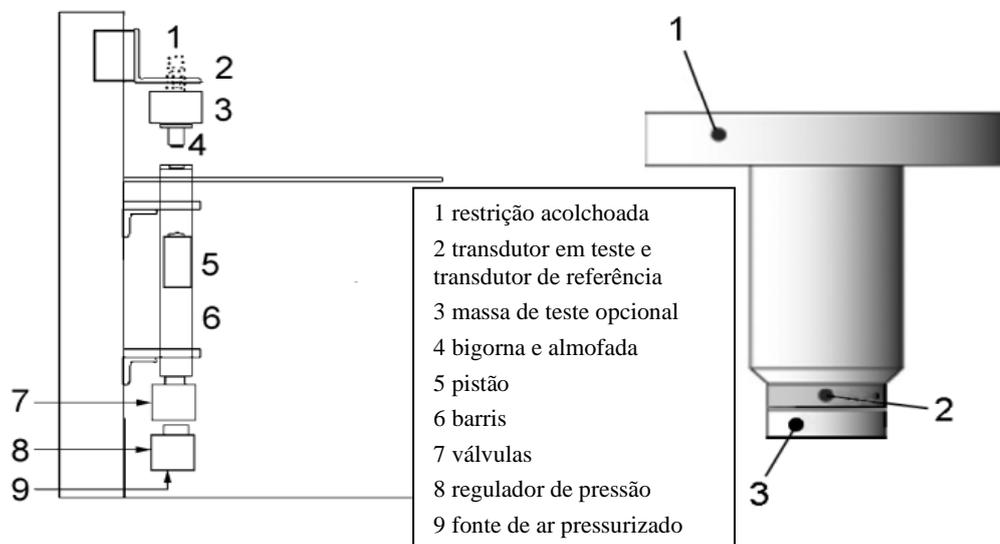
A aquisição de dados nesse método é tratada de forma convencional, utilizando-se a captura de dados em alta velocidade, embora alguns sistemas estejam adotando uma abordagem de FFT de banda larga.

Os principais benefícios dessa técnica pneumática convencional incluem a ampla faixa útil de amplitude, a rastreabilidade ao método primário, a operação simplificada e segura, a capacidade de adaptação fácil da duração e magnitude do impulso, e uma repetibilidade razoável.

As implementações modernas da calibração de choque pneumático são integradas perfeitamente às estações de trabalho padrão para calibração de acelerômetros. Isso permite a consolidação de bancos de dados de calibração de acelerômetros e facilita o uso de funções padrão, como a impressão de certificados de calibração, o salvamento e recuperação de dados, e o acompanhamento de tendências, entre outros recursos.

Esse aparelho (Figura 4) consiste em um reservatório pressurizado conectado a um cano que contém um projétil cativo, o qual é disparado contra uma bigorna selecionável localizada na outra extremidade do cano. A massa da bigorna e o material de amortecimento na superfície de impacto podem ser ajustados, juntamente com a variação da pressão do reservatório, para criar pulsos de choque com diferentes durações e amplitudes.

Figura 4 - Diagrama esquemático de um acelerômetro de choque



Fonte: [4]

B. Barra de Hopkinson

A barra Hopkinson é utilizada para lidar com níveis extremamente altos de choque, chegando a até 1000 km/s^2 ($\sim 100.000 \text{ g}$). Existem duas configurações principais: a barra Hopkinson dividida com um sensor de força piezoelétrico incorporado ou a barra Hopkinson de extremidade única com extensômetros colocados no meio ou com referência de velocidade ou aceleração na extremidade livre.

Na calibração de choque usando a barra dividida, o corpo de prova do material é substituído por um sensor de força piezoelétrico rígido. Desde que o impacto seja suficientemente longo com a segunda barra sendo curta o suficiente, a resposta da segunda barra pode ser aproximada como um movimento de corpo rígido. Assim, a aceleração é calculada aplicando a segunda lei de Newton, $F = ma$, onde a força, F , é medida e m é a massa do transdutor em teste.

C. Calibradores de choque de barra Hopkinson

Os calibradores de choque baseados na técnica da barra Hopkinson possuem uma ampla faixa de operação, abrangendo altas acelerações com valores de pico de 1 km/s^2 a 2.000 km/s^2 , permitindo assim a avaliação do desempenho de transdutores. A norma ISO 16063, especificamente a parte 22, define a faixa de 100 m/s^2 a 100 km/s^2 , a qual se baseia em metodologias primárias (o detalhamento encontra-se na ISO 16063-13).

Uma barra Hopkinson é geralmente definida como uma barra longa e fina, com uma relação comprimento/diâmetro superior a 10. Uma relação de aproximadamente 100 proporciona resultados excelentes para os métodos descritos nesta seção. O calibrador de barra Hopkinson pode ser equipado com extensômetros para medição de referência ou com um vibrômetro laser doppler (LDV).

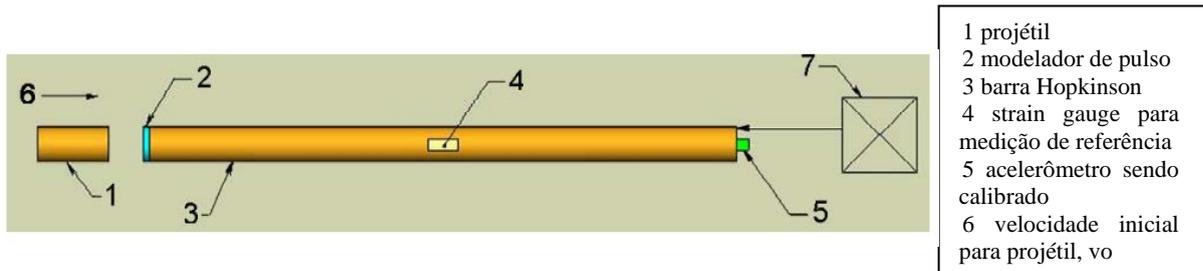
Comparando-se as medições de referência com o transdutor em teste, é possível realizar comparações de velocidade ou aceleração. Um calibrador de barra Hopkinson dividido compara uma aceleração de referência derivada de uma medição de força com o transdutor em teste. Todos os calibradores de barra Hopkinson podem ser utilizados para avaliar o desempenho dos transdutores em relação a valores de pico de aceleração de até 2.000 km/s^2 .

Para garantir a rastreabilidade aos padrões primários de choque, é necessário utilizar um transdutor de referência calibrado por meio de métodos primários para verificar a incerteza dos transdutores de referência utilizados nos calibradores de choque baseados na técnica da barra Hopkinson.

D. Calibrador de choque com barra Hopkinson por comparação em termos de velocidade ou aceleração

O transdutor em teste pode passar por calibração em termos de velocidade ao comparar sua saída integrada com a saída de extensômetros ou de um vibrômetro laser doppler. Na Figura 5, é apresentado um diagrama esquemático do calibrador de choque utilizando a técnica da barra Hopkinson.

Figura 5 - Diagrama esquemático do calibrador de choque utilizando a técnica da barra Hopkinson



Fonte: [4]

Além disso, é possível calibrar o transdutor em teste em termos de aceleração ao comparar sua saída com a derivada da saída de extensômetros ou de um vibrômetro laser doppler.

A Figura 6 ilustra um arranjo do calibrador de choque com barra Hopkinson.

Figura 6 – Calibrador de choque com barra Hopkinson



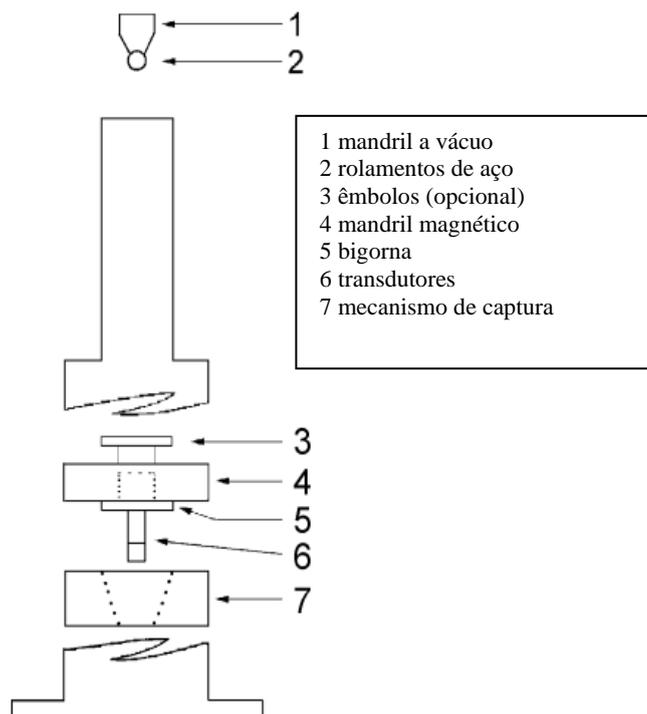
Fonte: <http://pt.china-test-equipment.com/material-test-machine/mechanical-testing-equipment/split-hopkinson-pressure-bar-shpb.html>

2.5.2 Método Dropball

O método Dropball (Figura 7) envolve o uso de uma bigorna magnetizada que carrega tanto o sensor de teste quanto o de referência. Esses sensores são colocados dentro de um tubo, que serve como guia para a bola que será solta. Através da variação do diâmetro e da massa da bola, bem como do material na interface de impacto, é possível personalizar o pulso de choque em termos de amplitude e frequência. A coleta de dados é geralmente realizada com alta velocidade de aquisição de tempo e analisada usando o método de amplitude de pico.

O método Dropball é comumente utilizado para testes de choque em faixas de 1 km/s^2 ($\sim 100 \text{ g}$) a 10 km/s^2 ($\sim 1000 \text{ g}$), como em aplicações automotivas de colisão. Ele também pode ser utilizado para valores de até 100 km/s^2 ($\sim 10.000 \text{ g}$). No entanto, é importante ressaltar que o alinhamento adequado é crucial nessa técnica, pois se a bola atingir fora do centro, ocorrerão grandes rotações.

Figura 7 - Diagrama esquemático do calibrador utilizando o método Dropball

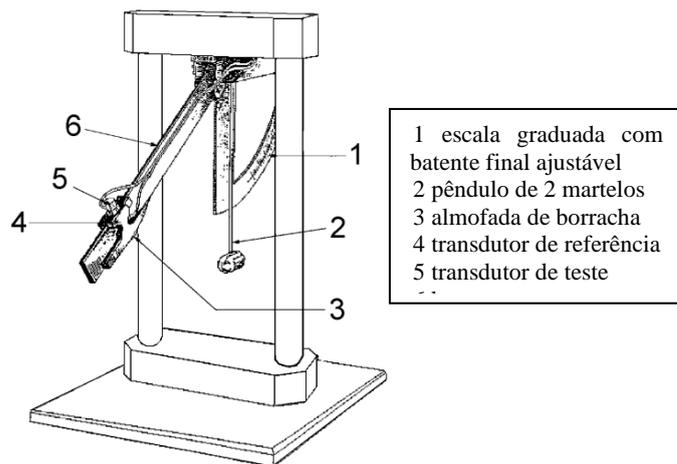


Fonte: [4]

2.5.3 Método de pêndulo

O método do pêndulo é baseado em uma estrutura rígida que inclui um pêndulo de martelo e um pêndulo de bigorna (Figura 8), onde os acelerômetros de teste e referência são instalados. O pêndulo de martelo é levantado a um ângulo pré-determinado e então solto para colidir com o pêndulo de bigorna através de uma almofada de borracha selecionada na superfície de contato, criando assim um pulso de choque em forma de meia onda.

Figura 8 - Diagrama esquemático do calibrador de choque pendular



Fonte: [4]

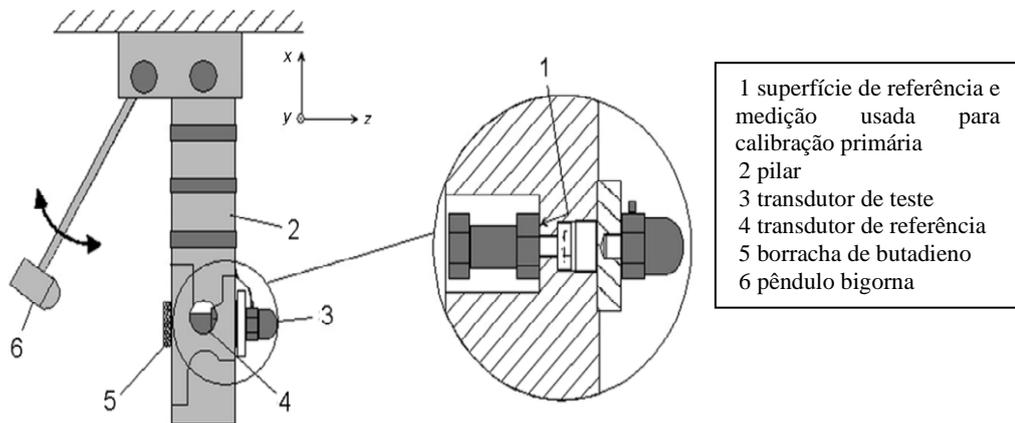
Para garantir a precisão dos resultados, é necessário posicionar os transdutores nos pontos nodais do primeiro modo axial de vibração dos pêndulos, além de alinhar o centro de gravidade da massa sísmica do transdutor de teste com o eixo sensível do transdutor de referência. A aquisição de dados durante o teste de choque pendular é geralmente realizada com um sistema digital de alta velocidade, e a análise é feita usando métodos como o ajuste de dados de tempo polinomial ou a determinação do valor máximo.

O calibrador de choque pendular permite avaliar a sensibilidade e linearidade da magnitude dos transdutores, além de ser uma maneira eficaz de calibrar grandes quantidades de transdutores. As calibrações de choque utilizando o método do pêndulo por comparação são realizadas em acelerações variando de 100 m/s^2 a 1.500 m/s^2 (10 gn a 150 gn) e em durações de meio pulso senoidal (medidas a 10% da magnitude) de 3 ms a 8 ms.

O calibrador de choque pendular é composto por uma estrutura rígida, um pêndulo de martelo e um pêndulo de bigorna. A placa de base quadrada tem dimensões aproximadas de 500 mm por 500 mm e uma altura de 780 mm, resultando em uma massa total de cerca de 60 kg. O comprimento do pêndulo de bigorna é de aproximadamente 400 mm. Para realizar o

impacto, o pêndulo de martelo é deslocado angularmente e solto, resultando em uma colisão com o pêndulo de bigorna. O deslocamento angular do pêndulo de martelo é determinado por uma escala angular graduada em graus.

Figura 9 – Detalhamento da área dos transdutores no calibrador de choque pendular



Fonte: [4]

Ambos os pêndulos têm momentos de inércia semelhantes para fornecer uma série de impactos com amplitude decrescente. Conforme exibido na Figura 9, uma almofada de borracha entre os dois pêndulos transmite o impacto com uma forma de pulso conhecida de um pêndulo para o outro. A dureza da almofada de borracha influencia a forma e a duração do pulso, assim como o número de impactos aplicáveis. Para criar um pulso de meia onda típico, a especificação da almofada de borracha é de 8 mm de espessura e dureza de 56 Shore A.

2.5.4 Principais normas utilizadas para calibração de transdutores de vibração

A calibração de transdutores de vibração segue normas técnicas e as principais estão listadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Normas para calibração de sensores de vibração

| Identificação | Descrição | Método | Faixa | Item |
|---------------|--|--------|--|-------|
| 5347:5 | Calibração pela gravidade da Terra | - | 0 Hz Incerteza: $\pm 0,01 \text{ m/s}^2$ | 3.1.4 |
| 5347:7 | Calibração primária por centrífuga | - | 0 Hz, nível DC 10 a 1000 m/s^2 | 3.1.2 |
| 5347:8 | Calibração primária por centrífuga dupla | - | 0,7 a 10 Hz 10 a 100 m/s^2 | - |

Fonte: [10]

A calibração de transdutores de vibração segue normas técnicas e as principais estão listadas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – As principais normas para calibração de transdutores de vibração

| Identificação | Descrição | Método | Faixa | Item |
|---------------|---|----------------------------|---|-------|
| 16063:11 | Calibração primária por interferometria a laser | Contagem de franjas | 1 a 800 Hz | 3.1.1 |
| | | Ponto mínimo | 800 a 10000 Hz | - |
| | | Aproximação de seno | 1 a 10000 Hz | - |
| 16063:12 | Calibração primária pelo método da reciprocidade | - | 40 a 5000Hz 10 a 100 m/s ² | 3.1.3 |
| 16063:13 | Calibração primária por choque usando interferometria a laser | - | - | - |
| 16063:15 | Calibração primária de vibração angular por interferometria a laser | Método 1A* | 1 a 800 Hz | - |
| | | Método 1B* | 1 a 800 Hz | |
| | | Método 2A* | 800 a 1600 Hz | |
| | | Método 2B* | 800 a 1600 Hz | |
| | | Método 3A* | 1 a 1600 Hz | |
| | | Método 3B* | 1 a 1600 Hz | |
| 16063:21 | Calibração por comparação a um transdutor de referência. | - | 20 a 5000 Hz 10 a 1000 m/s ² | 3.2.1 |
| 16063:22 | Calibração de choque por comparação a um transdutor de referência. | Pêndulo | 3 a 8 ms 100 a 1500 m/s ² | 3.2.2 |
| | | Pistão pneumático | 100 µs a 3 ms 200 a 100.000 m/s ² | 3.2.3 |
| | | Barra de Hopkinson | 0,05 ms 1000 a 2000.000 m/s ² | 3.2.4 |
| | | Queda de esfera | 0,1 a 10 ms 100 a 100.000 m/s ² | 3.2.5 |
| | | Barra cortada de Hopkinson | 0,3 ms 100.000 m/s ² | - |
| 16063:31 | Teste da sensibilidade a vibração transversal. | - | 1 a 5000 Hz 1 a 1000 m/s ² | - |

Fonte: [10]

3 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1 Notebook

Fabricante Dell
 Sistema Operacional Microsoft Windows 10 Pro
 Versão 10.0.19045 Compilação 19045
 Outra Descrição do Sistema Operacional Não disponível
 Fabricante do Sistema Operacional Microsoft Corporation
 Nome do sistema DESKTOP-09AJBSE
 Fabricante do sistema Dell Inc.
 Modelo do sistema Latitude 3450
 Tipo do sistema PC baseado em X64
 SKU do sistema 0631
 Processador Intel(R) Core(TM) i5-5200U CPU @ 2.20GHz, 2201 Mhz, 2 Núcleo(s), 4
 Processador(es) Lógico(s)
 Versão/data do BIOS Dell Inc. A10, 13/01/2016
 Versão do SMBIOS 2.8
 Versão do Controlador Incorporado 255.255
 Modo da BIOS UEFI
 Fabricante da BaseBoard Dell Inc.
 Produto BaseBoard 01241K
 Versão da BaseBoard A01
 Função da Plataforma Móvel
 Estado da Inicialização Segura Desativado
 Configuração PCR7 Ligação Impossível
 Pasta do Windows C:\Windows
 Pasta do sistema C:\Windows\system32
 Dispositivo de inicialização \Device\HarddiskVolume1
 Localidade Brasil
 Camada de Abstração de Hardware Versão = "10.0.19041.2728"
 Nome de usuário DESKTOP-09AJBSE\note
 Fuso horário Hora oficial do Brasil
 Memória Física (RAM) Instalada 8,00 GB
 Memória física total 7,91 GB

Memória física disponível 2,63 GB
 Memória virtual total 9,16 GB
 Memória virtual disponível 3,16 GB
 Espaço do arquivo de paginação 1,25 GB
 Arquivo de paginação C:\pagefile.sys
 Proteção de DMA de Kernel Desativado
 Segurança baseada em virtualização Não habilitado
 Suporte à Criptografia de Dispositivo Motivos da falha da criptografia de dispositivo automática: TPM não utilizável, Associação PCR7 não compatível, Falha na Interface de Teste de Segurança de Hardware, e o dispositivo não está em Espera Moderna, TPM não utilizável
 Hyper-V - Extensões de Modo Monitor VM Sim
 Hyper-V - Extensões de Conversão de Endereços de Segundo Nível Sim
 Hyper-V - Virtualização Habilitada no Firmware Sim
 Hyper-V - Proteção de Execução de Dados Sim

3.2 Sistema de Aquisição de Dados

Fabricante: Data physics

Modelo: Abacus 901

Número de série: 12525

entradas

- Resolução ADC: 24 bits Sigma Delta
- Resolução da Amostra (Filtragem/Processamento Digital): ponto flutuante de 32 bits
- Frequência máxima de amostragem: 216 kSamples/s
- Acoplamento: AC/DC, DIFF/SE, ICP, TEDS
- Impedância de entrada: 1 MOhm + 1MOhm (DIFF), 1MOhm + 50 Ohm (SE)
- Filtro anti-alias digital: -100 dB (0 a 40 kHz), -90 dB (40 a 90 kHz)
- Analog Anti-Alias: 3 pólos
- Faixa Dinâmica: 120 a 150 dB
- Faixas de entrada: 0,1 V, 0,31 V, 1 V, 3,1 V, 10 V, 31 V

- CMMR: 60 dB
- Tensão Máxima: 80 V máx/1 MOhm; 5 V máx/50 Ohm
- Precisão de amplitude: +/-0,2% FS a 1 kHz para 0 graus <math>< T < 55</math> graus C
- Resposta de frequência: +/- 0,5% 0 a 40 kHz, +/- 1% 40 a 80 kHz, +/- 2% 60 a 80 kHz na faixa de 30 V
- Precisão de fase: 0,5 graus a 40 kHz
- THD+N: 90 dB min @ 1kHz
- Offset: -/+ 0,1% FS Max (0,5% Max na faixa de 0,1V)
- Diafonia entre entradas: -90 dB
- Diafonia entre entradas e saídas: -90dB
- Precisão de frequência: 25 ppm

Saídas

- DAC: 24 bits Sigma Delta
- Amostragem: até 216 kSample/s
- Faixas: 1V, 2V, 5V, 10V; SE
- Corrente de saída: 10 mA
- THD: 90 dB
- Filtro de Reconstrução: 100dB Stop Band

3.3 Acelerômetro Padrão Endevco

Modelo: 2270M8

Número de série:16199

Tipo de saída: Carga

Sensibilidade: 2,2 pC/g | 0,22 pC/(m/s²)

Temperatura máxima: 350°F | 177°C

Faixa de medição máxima: 15000 g pico

Frequência Máxima ($\pm 5\%$): 20000 Hz

Número do Eixos: 1

Peso: 16,5 gramas

3.4 Acelerômetro em calibração

Fabricante: Bruel & Kjaer

Modelo: 4383

Número de série:32617

Tipo de saída: Carga

Sensibilidade: 31,10 pC/g | 3,172 pC/(m/s²)

Temperatura máxima: -74 – 250 °C

Faixa de medição máxima: 2000 g pico

Faixa de Frequência ($\pm 5\%$): 0.1 – 8400 Hz

Número do Eixos: 1

Peso: 17 gramas

3.5 Amplificador de sinais do acelerômetro padrão

Fabricante: Bruel & Kajer

Modelo: 2525

Número de série:3251251353

ENTRADA DE CARGA:

Flutuante ou aterrado via soquete TNC na frente

máx. Entrada 0 a 100 kHz: pico de 50 nC

máx. Tensão de modo comum na entrada flutuante:

5Vpico no nível de entrada de carga máx. 10nCpico

Taxa de Rejeição de Modo Comum (CMRR):

Com ganho de entrada +20 a +60 dB:

100 Hz CMRR >60 dB

10 kHz CMRR >45 dB

Com ganho de entrada -20 a +10 dB:

100 Hz CMRR >50 dB

10 kHz CMRR >40 dB

Sensibilidade total:

0,1 pC a 10 nC em passos de 10 dB para 1 V ligado

Saída CA

0,03 pC a 10 nC em etapas de 0,01 dB para

1 V na saída CA, com frequência reduzida

Ganhos:

Ganho de entrada (antes da filtragem e integração): Seleccionável de -20 dB a +60 dB em

etapas de 10 dB

Ganho Variável (antes da filtragem e integração): Seleccionável de 0dB a 11dB em passos de 0,01dB

Ganho de saída (após filtragem e integração): Seleccionável 0 dB, 10 dB e 20 dB

Ruído inerente 2 Hz a 22 kHz

Terminação simples: <5 fC (<7 fC @ 90% UR)

Flutuante: <10 fC

na saída CA, referente à entrada com máximo
sensibilidade, limite de frequência inferior = 1 Hz e
1 capacitância do transdutor nF

Precisão de ganho (da entrada para a saída CA em
1 kHz):

Aceleração e força: Melhor que 2%

Velocidade: Melhor que 2,5%

Deslocamento: Melhor que 3,0% a 100 Hz

DeltaTron

ENTRADA:

Via soquete BNC na frente

Sensibilidade:

100 μ V a 10 V em etapas de 10 dB para 1 V em CA
saída

30 μ V a 10 V em etapas de 0,01 dB para 1 V ligado

Saída CA, com faixa de frequência reduzida

Ganhos:

Ganho de entrada (antes da filtragem e integração): Seleccionável de -20 dB a +60 dB em
etapas de 10 dB

Ganho Variável (antes da filtragem e integração): Seleccionável de 0 dB a 11 dB em etapas de
0,01 dB

Ganho de saída (após filtragem e integração): Seleccionável 0 dB, 10 dB, 20 dB

Precisão de ganho:

Aceleração e força: Melhor que 2%

Velocidade: Melhor que 2,5%

Deslocamento: Melhor que 3,0%

Ruído inerente 2 Hz a 22 kHz:

<20 μ V referente à entrada com sensibilidade máxima e impedância de saída do transdutor <1 k Ω

Impedância de entrada: >100 k Ω

Fonte de alimentação para DeltaTron Acelerômetro:

Corrente constante: 4 mA.

Tensão máxima na entrada DeltaTron: 27 V

Deteção fora de alcance na alimentação DeltaTron

tensão (<3 V ou >21 V)

SAÍDA DO PRÉ-AMPL:

Soquete BNC na parte traseira

Sinal de aceleração após filtro passa-alta de 1ª ordem, ganho de entrada e ganho variável

3.6 Amplificador de sinais do acelerômetro em calibração

Fabricante:Kistler

Modelo/Tipo: 5004

Número de Série: C356584

Tipos de entrada: Dual mode amplifier

Tipo de acelerômetros: ICP e Carga

Sensibilidade do Transdutor: 1.0 pC or mV per Mechanical Unit

Faixa de sensibilidade: 1-11

Escala: 10, 100, 1k Mechanical Units per V

Time constant: Short Operate

Filtro: fc 180 kHz

3.7 Pêndulo

Fabricação própria (Apêndice A) com dimensões: largura de 500 mm, espessura de 500 mm e altura de 780 mm; Massa total: 60 kg e comprimento do braço do pêndulo de 400 mm.

3.8 Cabos Utilizados

Dois cabos de alimentação padrões industriais

Dois cabos microdot

Dois cabos BNC-BNC

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A calibração realizada neste trabalho seguiu a norma ISO 16063-22 (Métodos para calibração de transdutores de vibração e choque – Part 22: Calibração de choque por comparação à um transdutor de referência), cujas condições de incerteza para a calibração estão descritas no Anexo A e os procedimentos para o cálculo da sensibilidade constam do Anexo B.

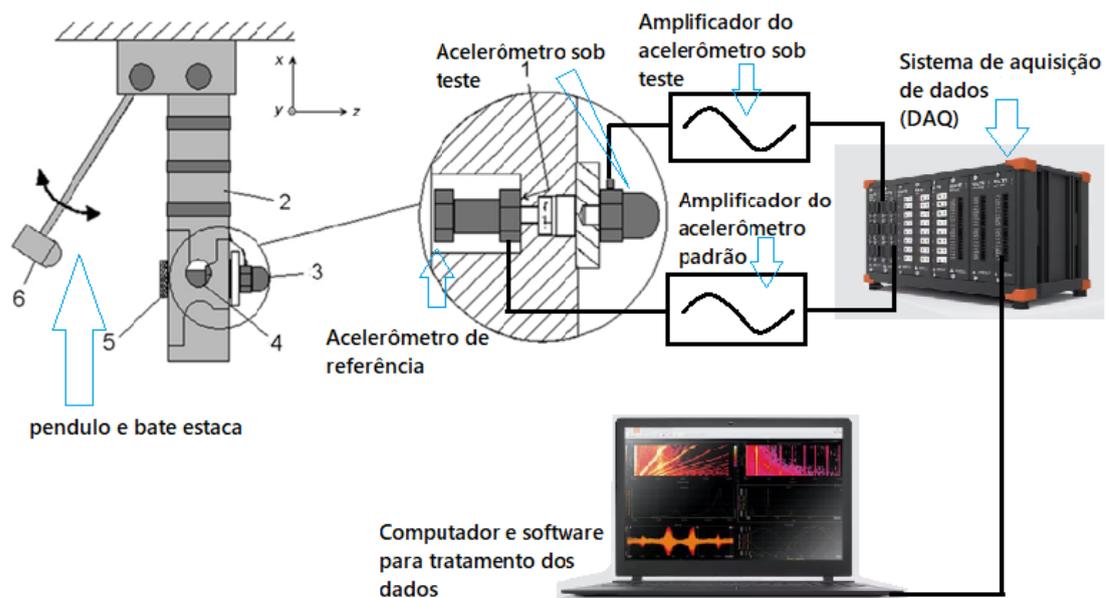
Para este trabalho, foi montado um sistema de calibração, ilustrado pela Figura 10, seguindo os procedimentos descritos na norma ISO 16063-22, como citado anteriormente.

O pêndulo foi construído conforme a norma ISO 16063-22 de forma artesanal de acordo com as especificações dos croquis no Apêndice A

4.1 Sistema de Calibração

A Figura 10 ilustra o sistema de calibração utilizado neste trabalho.

Figura 10 - Diagrama de montagem do sistema de calibração



Fonte: Autoria própria

Os dois acelerômetros utilizados na calibração necessitam da amplificação dos sinais de saída gerados por eles quando estão submetidos ao teste de calibração, devido a sensibilidade deles ser na casa de micro ou milivolts por m/s^2 , quando são acelerômetros ICP ou micro ou pico Coulombs quando são acelerômetros de carga.

O papel do amplificador como já diz o nome é amplificar os sinais dos acelerômetros entregando para a DAQ sinais com maiores amplitudes e distantes da zona de ruído, fazendo com que os sinais possam ser adquiridos com boa qualidade e visualização.

Depois dos sinais do acelerômetro serem amplificados, os sinais entram no sistema de aquisição de dados. Conforme a norma ISO 16063:22, o sistema de aquisição de dados fará a aquisição do choque de meia senoide transformando os sinais analógicos adquiridos em sinais digitais.

Por fim, temos o computador e o software de medição utilizados para análise dos dados adquiridos pela DAQ. Com eles conseguimos analisar a amplitude do choque gerado pelo pêndulo em m/s^2 , o período do choque, a frequência e através de cálculos matemáticos a sensibilidade do acelerômetro sob teste.

4.2 Estudo do sistema e rastreabilidade

Devemos garantir a rastreabilidade dos padrões utilizados atendendo os pré-requisitos da norma, a partir da calibração dos dispositivos padrões utilizados.

Para garantir confiabilidade nas medições, precisamos realizar estudos, determinados pela norma, que verifiquem a faixa da aceleração e qualidade do sinal gerado pelo pêndulo.

4.2.1 Resposta de ganho e frequência dos amplificadores utilizados

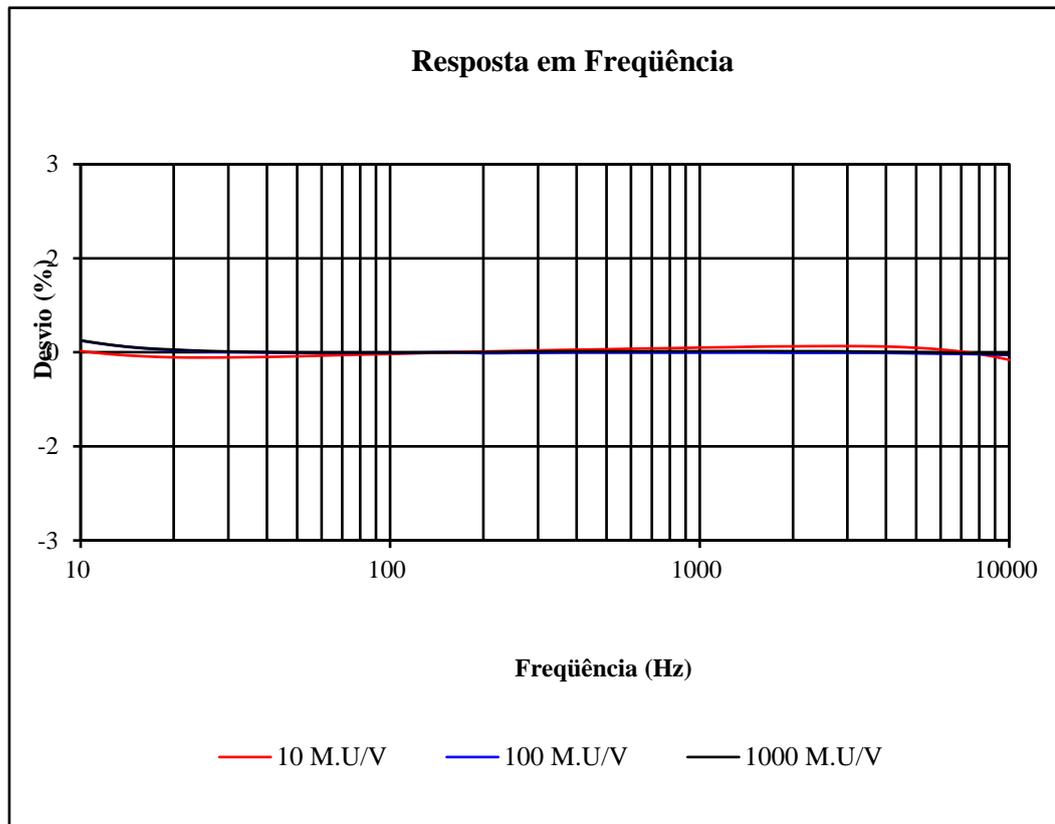
A Tabela 4 mostra a resposta em frequência do amplificador de sinais do acelerômetro padrão. Estes dados mostram que o amplificador responde totalmente aos requisitos de calibração, pois, tem uma resposta plana na faixa de 10 à 10kHz independente da configuração de ganho, conforme pode ser visto no gráfico exibido na Figura 11.

Tabela 4 – Resposta de ganho e frequência do amplificador de sinais padrão

| Frequência (Hz) | Sensibilidade (mV/pC) | | | Desvio (%) | | |
|--------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | Ganho 10 M.U/V | Ganho 100M.U/V | Ganho 1k M.U/V | Ganho 10 M.U/V | Ganho 100 M.U/V | Ganho 1k M.U/V |
| 10 | 101,19 | 10,06 | 1,005 | 0,02 | 0,19 | 0,19 |
| 13 | 101,14 | 10,05 | 1,005 | -0,03 | 0,12 | 0,12 |
| 16 | 101,11 | 10,05 | 1,004 | -0,06 | 0,06 | 0,07 |
| 20 | 101,09 | 10,05 | 1,004 | -0,08 | 0,04 | 0,04 |
| 25 | 101,09 | 10,04 | 1,004 | -0,08 | 0,01 | 0,02 |
| 32 | 101,09 | 10,04 | 1,004 | -0,08 | 0,00 | 0,01 |
| 40 | 101,10 | 10,04 | 1,003 | -0,07 | 0,00 | 0,00 |
| 50 | 101,11 | 10,04 | 1,003 | -0,06 | -0,01 | 0,00 |
| 63 | 101,12 | 10,04 | 1,003 | -0,05 | -0,01 | 0,00 |
| 80 | 101,14 | 10,04 | 1,003 | -0,04 | -0,01 | 0,00 |
| 100 | 101,15 | 10,04 | 1,003 | -0,03 | -0,01 | 0,00 |
| 125 | 101,16 | 10,04 | 1,003 | -0,01 | 0,00 | 0,00 |
| 160 | 101,17 | 10,04 | 1,003 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 200 | 101,19 | 10,04 | 1,003 | 0,01 | -0,01 | 0,00 |
| 250 | 101,20 | 10,04 | 1,003 | 0,02 | -0,01 | 0,01 |
| 315 | 101,21 | 10,04 | 1,004 | 0,03 | -0,01 | 0,01 |
| 400 | 101,22 | 10,04 | 1,004 | 0,04 | 0,00 | 0,02 |
| 500 | 101,22 | 10,04 | 1,004 | 0,05 | 0,00 | 0,02 |
| 630 | 101,23 | 10,04 | 1,004 | 0,06 | 0,00 | 0,02 |
| 800 | 101,24 | 10,04 | 1,004 | 0,07 | 0,00 | 0,02 |
| 1000 | 101,25 | 10,04 | 1,004 | 0,08 | 0,00 | 0,02 |
| 1250 | 101,26 | 10,04 | 1,004 | 0,08 | 0,00 | 0,02 |
| 1600 | 101,27 | 10,04 | 1,004 | 0,09 | 0,00 | 0,02 |
| 2000 | 101,27 | 10,04 | 1,004 | 0,10 | -0,01 | 0,02 |
| 2500 | 101,27 | 10,04 | 1,004 | 0,10 | -0,01 | 0,02 |
| 3150 | 101,27 | 10,04 | 1,004 | 0,10 | -0,01 | 0,01 |
| 4000 | 101,27 | 10,04 | 1,003 | 0,09 | -0,01 | 0,01 |
| 5000 | 101,25 | 10,04 | 1,003 | 0,07 | -0,02 | 0,00 |
| 6300 | 101,21 | 10,04 | 1,003 | 0,04 | -0,02 | -0,01 |
| 8000 | 101,15 | 10,04 | 1,003 | -0,03 | -0,03 | -0,02 |
| 10000 | 101,05 | 10,04 | 1,003 | -0,12 | -0,04 | -0,03 |

Fonte: Autoria própria

Figura 11 - Gráfico de resposta em frequência do amplificador do acelerômetro padrão



Fonte: Autoria própria

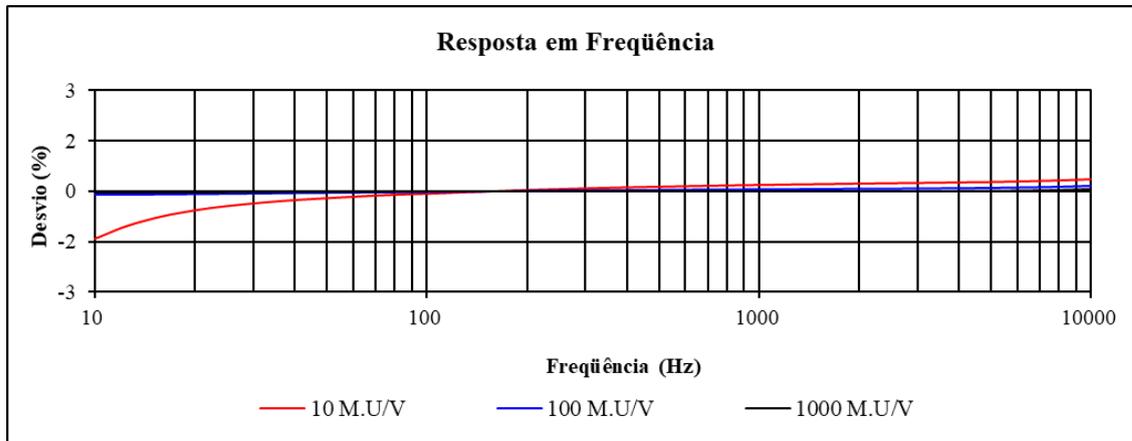
A Tabela 5 e a Figura 12 mostram a resposta em frequência do amplificador de sinais do acelerômetro em calibração. Esta tabela é a prova real de que o amplificador responde totalmente aos requisitos de calibração, pois, tem uma resposta plana na faixa de 10 à 10kHz nos ganhos de 10 e 1x e tem uma leve atenuação no ganho de 100x abaixo de 80Hz, porém é identificada e a sua atenuação não está menor que 1,5% em 10 Hz então podemos dizer que o amplificador tem uma resposta plana em todas as configurações e atende as especificações para ser utilizado na calibração. Os certificados de calibração do acelerômetro padrão e da DAQ utilizados se encontram no Anexo C.

Tabela 5 – Resposta de ganho e frequência do amplificador de sinais do acelerômetro em calibração

| Frequência (Hz) | Sensibilidade (mV/pC) | | | Desvio (%) | | |
|--------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | Ganho 10 M.U/V | Ganho 100 M.U/V | Ganho 1k M.U/V | Ganho 10 M.U/V | Ganho 100 M.U/V | Ganho 1k M.U/V |
| 10 | 98,02 | 9,952 | 0,9997 | -1,43 | -0,10 | -0,03 |
| 13 | 98,41 | 9,953 | 0,9997 | -1,04 | -0,10 | -0,03 |
| 16 | 98,70 | 9,953 | 0,9996 | -0,75 | -0,09 | -0,04 |
| 20 | 98,88 | 9,954 | 0,9997 | -0,57 | -0,08 | -0,03 |
| 25 | 99,00 | 9,955 | 0,9997 | -0,45 | -0,08 | -0,03 |
| 32 | 99,10 | 9,956 | 0,9998 | -0,35 | -0,06 | -0,02 |
| 40 | 99,18 | 9,957 | 0,9998 | -0,27 | -0,05 | -0,02 |
| 50 | 99,24 | 9,958 | 0,9998 | -0,21 | -0,04 | -0,02 |
| 63 | 99,29 | 9,959 | 0,9999 | -0,16 | -0,04 | -0,01 |
| 80 | 99,34 | 9,960 | 0,9999 | -0,11 | -0,03 | -0,01 |
| 100 | 99,37 | 9,960 | 0,9999 | -0,08 | -0,02 | -0,01 |
| 125 | 99,41 | 9,962 | 1,0000 | -0,04 | -0,01 | 0,00 |
| 160 | 99,45 | 9,962 | 1,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 200 | 99,48 | 9,963 | 1,0000 | 0,03 | 0,01 | 0,00 |
| 250 | 99,51 | 9,965 | 1,0001 | 0,06 | 0,02 | 0,01 |
| 315 | 99,54 | 9,965 | 1,0001 | 0,09 | 0,03 | 0,01 |
| 400 | 99,56 | 9,965 | 1,0001 | 0,11 | 0,03 | 0,01 |
| 500 | 99,58 | 9,966 | 1,0001 | 0,13 | 0,04 | 0,01 |
| 630 | 99,60 | 9,967 | 1,0000 | 0,15 | 0,05 | 0,00 |
| 800 | 99,62 | 9,968 | 1,0000 | 0,17 | 0,05 | 0,00 |
| 1000 | 99,63 | 9,968 | 1,0000 | 0,19 | 0,06 | 0,00 |
| 1250 | 99,65 | 9,969 | 1,0000 | 0,20 | 0,06 | 0,00 |
| 1600 | 99,66 | 9,969 | 1,0000 | 0,22 | 0,07 | 0,00 |
| 2000 | 99,68 | 9,970 | 1,0000 | 0,23 | 0,08 | 0,00 |
| 2500 | 99,69 | 9,970 | 1,0000 | 0,24 | 0,08 | 0,00 |
| 3150 | 99,70 | 9,971 | 1,0000 | 0,25 | 0,08 | 0,00 |
| 4000 | 99,71 | 9,972 | 1,0000 | 0,27 | 0,09 | 0,00 |
| 5000 | 99,72 | 9,972 | 1,0001 | 0,28 | 0,10 | 0,01 |
| 6300 | 99,74 | 9,974 | 1,0001 | 0,30 | 0,11 | 0,01 |
| 8000 | 99,77 | 9,976 | 1,0003 | 0,32 | 0,13 | 0,03 |
| 10000 | 99,80 | 9,979 | 1,0006 | 0,36 | 0,16 | 0,06 |

Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Gráfico de resposta de ganho e frequência do amplificador de sinais do acelerômetro em calibração



Fonte: Autoria própria

Tabela 6 – Faixa de frequência e aceleração do Pêndulo

| Aceleração (m/s²) | período meia onda (ms) | Período da senoide (ms) | Frequência (Hz) |
|---|---------------------------------------|--|----------------------------|
| 57.8 | 4.26 | 8.52 | 117.4 |
| 79.0 | 3.88 | 7.76 | 128.9 |
| 116.3 | 3.54 | 7.08 | 141.2 |
| 144.8 | 3.30 | 6.60 | 151.5 |
| 212.1 | 2.92 | 5.84 | 171.2 |
| 259.3 | 2.76 | 5.52 | 181.2 |
| 342.1 | 2.62 | 5.24 | 190.8 |
| 355.5 | 2.50 | 5.00 | 200.0 |
| 466.7 | 2.38 | 4.76 | 210.1 |
| 485.6 | 2.30 | 4.60 | 217.4 |
| 635.5 | 2.04 | 4.08 | 245.1 |
| 635.5 | 2.04 | 4.08 | 245.1 |
| 958.0 | 1.84 | 3.68 | 271.7 |
| 1064.3 | 1.80 | 3.60 | 277.8 |
| 1252.2 | 1.66 | 3.32 | 301.2 |
| 1531.0 | 1.54 | 3.08 | 324.7 |
| 1988.4 | 1.42 | 2.84 | 352.1 |

Fonte: Autoria própria

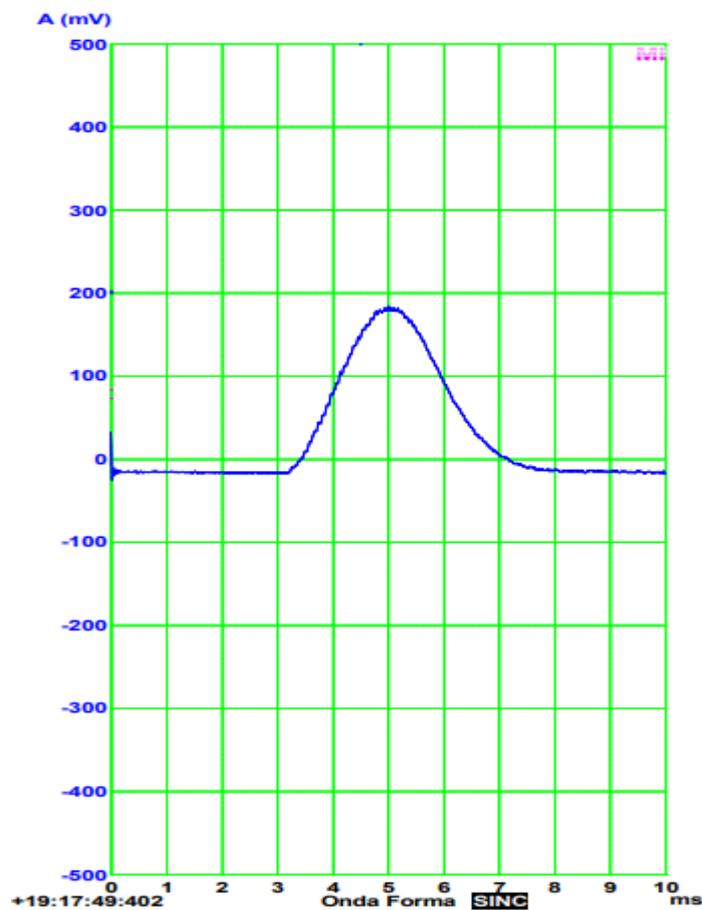
4.2.2 Análise da aceleração e tempo de impacto gerado pelo pendulo

Com este estudo foi possível obter a faixa de frequência e aceleração do pendulo através de medições feitas desde 50 m/s² até perto dos 1988 m/s², onde começamos a entrar na faixa de distorção do sinal, conforme os dados da Tabela 6.

A norma ISO 16063 parte 22 diz que a faixa de medição de calibração utilizando o pendulo é de 100 m/s^2 até 1500 m/s^2 . E a medidas dos pulsos são por volta de 8 ms à 100 m/s^2 e 3 ms à 1500 m/s^2 .

A borracha utilizada para amortecimento da bigorna e o bate-estaca têm uma dureza de 60 Shore, muito próximo do que pede a norma 56 Shore A, lembrando que variando a dureza da borracha de amortecimento temos outras frequências e amplitudes, porém, estamos seguindo a norma e os seus procedimentos.

Figura 13 – Medidas da primeira linha da Tabela 6

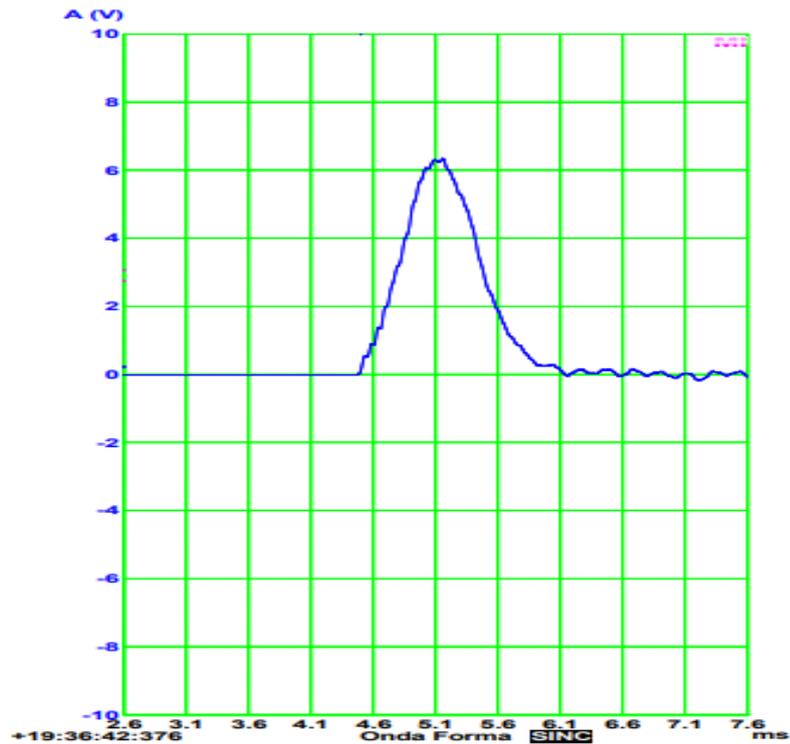


Fonte: Autoria própria

A Figura 13 mostra a primeira aquisição da Tabela 6 com os valores das medidas sendo: aceleração = $57,8 \text{ m/s}^2$, período da senoide = $8,52 \text{ ms}$ e frequência = $117,4 \text{ Hz}$.

Obtivemos um pulso de meia onda tradicional e com boa qualidade, ao decorrer das medidas nota se que a frequência aumenta conforme a magnitude do choque do pendulo aumenta.

Figura 14 – Medidas da última linha da Tabela 6



Fonte: Autoria própria

A Figura 14 mostra a última aquisição da Tabela 6 com os valores das medidas sendo: aceleração = 1988.4 m/s^2 , período da senóide = 2.84 ms e frequência = 352.1 Hz .

Analisando a Figura 14 notamos que o pulso de meia onda já não é tão uniforme quanto o primeiro pulso, sendo assim, pode trazer efeitos de incerteza na calibração. Para efetuar a calibração, precisamos ter um sinal de choque puro com mínimas distorções possíveis e com uma boa visualização, sendo eles de 100 a 1500 m/s^2 conforme diz a norma ISO16063 parte 22.

4.3 Calibração do acelerômetro

Nesta parte deste trabalho de graduação iremos mostrar o procedimento utilizado para a realização da calibração do acelerômetro desde o início que vai desde a seleção dos equipamentos utilizados até a emissão do certificado de calibração conforme a norma 16063: parte 2.

O primeiro passo deve ser a familiarização com os requisitos e reúna os procedimentos de calibração descritos na norma ISO 16063-22.

Devemos nos certificar de ter todos os equipamentos e instrumentos que compõem o sistema de calibração (Figura 10), necessários para realizar a calibração. Entre eles estão: pêndulo de choque, acelerômetro padrão, acelerômetro para calibração, cabos para conexão entre os acelerômetros e os amplificadores, cabos de alimentação para os equipamentos utilizados, medidor de temperatura e umidade relativa, amplificadores de sinais, sistema de aquisição de dados e computador.

Conforme a norma determina devemos ter controle sobre as condições ambientais, e como boas práticas de calibração normalmente ligamos o ar-condicionado e o sistema de controle de umidade relativa.

A calibração deve ser realizada nas seguintes condições ambientais:

- a) temperatura ambiente: $(23 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$;
- b) umidade relativa: 75% no máximo.

Conforme descrito na norma ISO 16063:22 a temperatura da sala de calibração não deve ter uma variação de $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, ou seja, a temperatura da sala deve estar entre 20 e 26 $^\circ\text{C}$, e a umidade relativa não deve exceder os 75%.

Conforme a norma ISO 16063:22, ao montar os transdutores (seja o de referência ou o transdutor em teste), é necessário garantir que todas as superfícies estejam polidas, planas e limpas.

A superfície onde o transdutor será montado deve ter uma rugosidade menor que 1 μm . Além disso, a planicidade deve permitir que haja uma separação de até 5 μm entre dois planos paralelos, em toda a área correspondente à montagem do maior transdutor a ser calibrado.

O orifício perfurado e rosqueado usado para conectar o transdutor deve ter uma tolerância de perpendicularidade à superfície menor que 10 μm . Isso significa que a linha central do furo deve estar dentro de uma zona cilíndrica de diâmetro de 10 μm e altura igual à profundidade do furo.

O transdutor deve ser estruturalmente rígido. A sensibilidade de deformação de base, a sensibilidade transversal e a estabilidade da combinação transdutor/amplificador devem ser levados em consideração ao calcular a incerteza de medição.

Começamos com a montagem do acelerômetro padrão (Figura 15) na parte interna do pêndulo:

Figura 15 – Posicionamento do acelerômetro padrão dentro do pêndulo



Fonte: Autoria própria

Começamos retirando a tampa que contém a borracha de amortecimento do choque, para a inserção do acelerômetro padrão, através do orifício colocamos o acelerômetro dentro da bigorna, lugar onde o padrão deve ficar na execução da calibração (Figura 16).

Figura 16 – Fixação do acelerômetro padrão



Fonte: Autoria própria

Após a inserção do acelerômetro devemos fixá-lo com um parafuso allen sextavado interno, para garantirmos a fixação necessária. O torque recomendado para a fixação de qualquer acelerômetro é sempre encontrado no seu próprio manual de utilização no caso do acelerômetro padrão utilizado o torque necessário e determinado pelo fabricante é de 2 N.m, com um torquímetro conseguimos medir o torque aplicado na fixação do acelerômetro.

Figura 17 – Fixação do cabo no acelerômetro padrão



Fonte: Autoria própria

Após a inserção e fixação do acelerômetro, conectamos o cabo pela lateral do acelerômetro (Figura 17).

Figura 18 – Posicionamento da tampa na bigorna



Fonte: Autoria própria

Após a fixação do acelerômetro padrão fechamos o orifício com uma tampa de metal que contém a borracha de 60 Shore A para absorção do impacto do choque (Figura 18 e Figura 19).

Figura 19 – Fixação da tampa na bigorna



Fonte: Autoria própria

Aplicamos o torque de 2 N.m nos dois parafusos de fixação para garantir a estabilidade no teste.

Figura 20 – Fixação do conector do acelerômetro sob teste



Fonte: Autoria própria

Normalmente os acelerômetros têm diversos tipos e dimensões de roscas de fixação, com isso, utilizamos de adaptadores e conectores para as fixações dos acelerômetros sobre teste (Figura 20). Fixamos o adaptador no pêndulo onde será fixado o acelerômetro a ser calibrado (Figura 21).

Figura 21 – Fixação do acelerômetro a ser calibrado



Fonte: Autoria própria

Antes de fixar o acelerômetro a ser calibrado inspecione visualmente o acelerômetro para garantir que não haja danos físicos e verifique se o acelerômetro está limpo e livre de qualquer substância que possa afetar a medição.

Figura 22 – Aplicação de torque sobre o acelerômetro a ser calibrado



Fonte: Autoria própria

Após a montagem do acelerômetro foi aplicado o torque conforme o manual do acelerômetro, que é de no mínimo 0,5 N.m e máximo 3,5 N.m, então decidimos aplicar o torque de 2 N.m o mesmo torque utilizado para a fixação do acelerômetro padrão (Figura 22).

Figura 23 – Ligação do cabo no acelerômetro a ser calibrado



Fonte: Autoria própria

Após a montagem do acelerômetro no adaptador conectamos o cabo através de rosqueamento (Figura 23 e Figura 24).

Figura 24 – Posicionamento do cabo conectado ao acelerômetro a ser calibrado



Fonte: Autoria própria

Após a conexão do cabo, devemos garantir que o mesmo se encontra livre de dobramentos, ou esteja encostando no dispositivo, pois o cabo do acelerômetro tem muita influência na resposta e sensibilidade do acelerômetro, quando não está bem-posicionado.

Figura 25 – Fixação dos cabos dos acelerômetros



Fonte: Autoria própria

Após realizar a fixação dos acelerômetros e a conexão dos cabos, devemos acoplar os cabos aos fixadores (Figura 25) para não só uma melhor visualização da calibração como também para evitar o perigo do enroscamento dos cabos na estrutura.

Figura 26 – Conexão dos acelerômetros nos amplificadores



Fonte: Autoria própria

Agora é a hora de conectar os acelerômetros nos amplificadores de sinais de acelerômetros (Figura 26). Os cabos utilizados são chamados de cabos coaxiais com conectores microdot, cabos muito populares no mundo da vibração. Certifique-se de utilizar os conectores e adaptadores estão livres de corrosão, defeitos e dobramentos, assim, estando aptos para uma boa medição (Figura 27).

Figura 27 – Saída dos amplificadores de sinais



Fonte: Autoria própria

Após a conexão dos acelerômetros nos amplificadores, devemos conectar os amplificadores de sinais no sistema de aquisição de dados ou DAQ (Figura 28). Os cabos utilizados foram cabos coaxiais com conectores BNC nas duas extremidades.

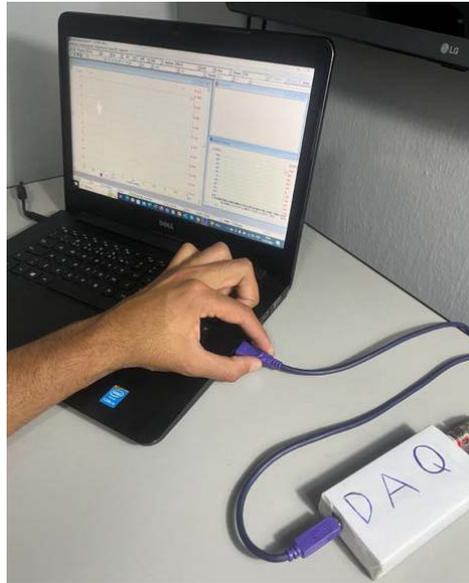
Figura 28 – Conexão dos cabos na DAQ



Fonte: Autoria própria

O sistema de aquisição de dados utilizado se dispõe de dois canais de medição canal A e canal B, a saída do amplificador do acelerômetro sob teste foi conectada ao canal A e a saída do amplificador do acelerômetro padrão foi conectada ao canal B (Figura 29).

Figura 29 – Conexão da DAQ no notebook



Fonte: Autoria própria

Após a conexão dos amplificadores de sinais na DAQ, conectamos a DAQ no notebook com um cabo USB.

Figura 30 – Configuração dos amplificadores de sinais



Fonte: Autoria própria

4.3.1 Ajuste do ganho dos amplificadores

Após todas as conexões serem feitas, devemos configurar os ganhos dos amplificadores (Figura 30).

O ganho em amplificadores de acelerômetros é uma medida da relação entre a entrada e a saída do amplificador. Ele determina a quantidade pela qual o sinal do acelerômetro é amplificado antes de ser enviado para outros circuitos ou dispositivos de medição, como no nosso caso a DAQ.

O ganho é geralmente expresso em decibéis (dB) ou em uma proporção numérica. Por exemplo, um ganho de 20 dB significa que o sinal de saída é amplificado em 20 vezes em relação ao sinal de entrada. Um ganho de 10x indica que o sinal é amplificado dez vezes. O objetivo principal do ganho em um amplificador de acelerômetro é melhorar a sensibilidade e a resolução do sinal medido. Ele amplifica o sinal de baixa amplitude gerado pelo acelerômetro para um nível mais adequado para aquisição e análise de dados.

No entanto, é importante selecionar um ganho adequado para evitar a saturação do sinal ou o aumento excessivo do ruído. Um ganho muito alto pode levar a uma saturação do amplificador, onde o sinal amplificado atinge o limite máximo que o amplificador pode fornecer, resultando em distorção. Por outro lado, um ganho muito baixo pode comprometer a resolução e a capacidade de detectar variações menores no sinal.

A seleção do ganho em um amplificador de acelerômetro depende das características específicas do acelerômetro, da faixa de frequência de interesse e dos requisitos da aplicação. É importante consultar as especificações técnicas do acelerômetro e do amplificador ou seguir as orientações do fabricante para determinar o ganho adequado para o sistema.

4.3.2 Configuração do software de medição (osciloscópio)

Após fazermos todas as montagens dos acelerômetros, conexão dos cabos e configurações dos ganhos dos amplificadores, devemos realizar uma verificação funcional preliminar do acelerômetro para garantir que ele esteja respondendo corretamente aos estímulos aplicados.

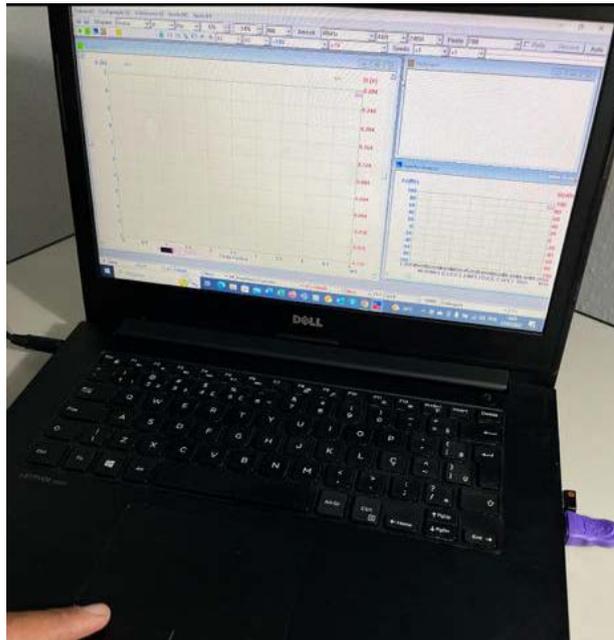
Devemos também nos certificar de que os acelerômetros estejam configurados corretamente no equipamento de medição e que os parâmetros de medição estejam definidos de acordo com a norma.

Agora estamos prontos para iniciar a calibração na prática.

Devemos deixar a cadeia de medição em estabilização térmica e elétrica com as condições ambientais por no mínimo 30 minutos, dentro das condições pré-definidas pela norma ISO 16063 parte:22, para que consigamos obter o mínimo de incerteza de medição possível na calibração.

Após a estabilização térmica estamos prontos para começar a calibração, seguimos para o notebook fazendo os ajustes necessários no software de medição (Figura 31).

Figura 31 – Configuração do software de medição



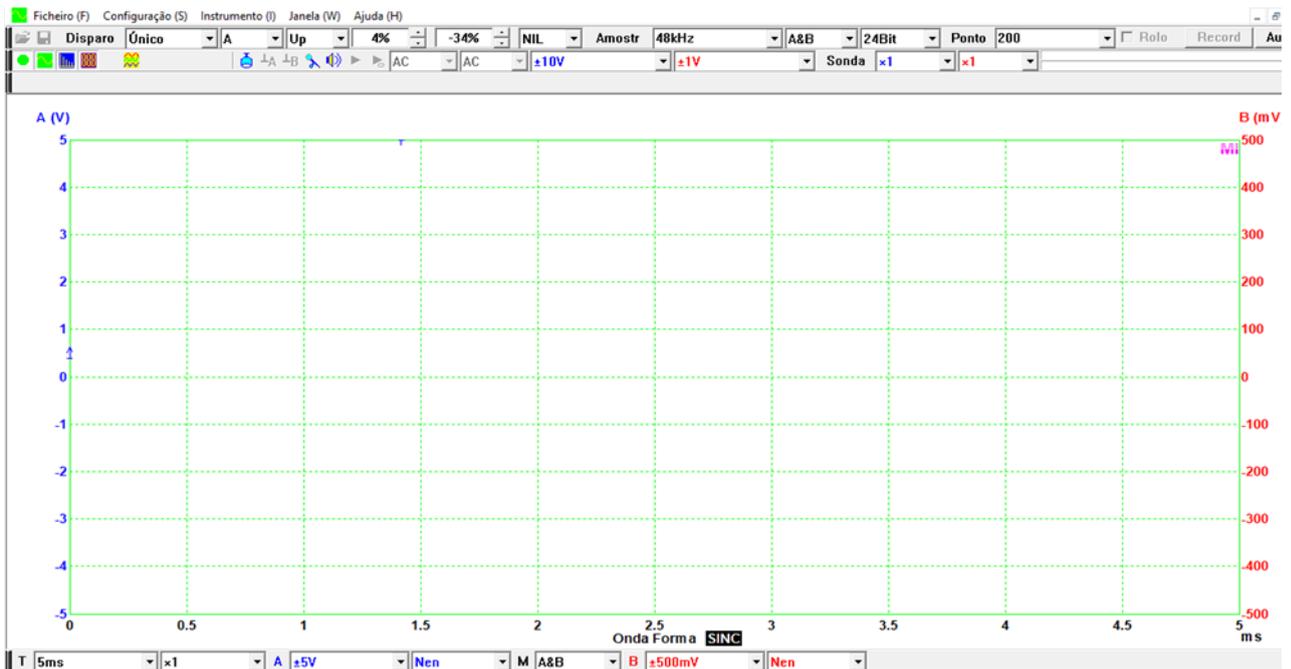
Fonte: Autoria própria

Conforme a norma ISO 16063:22 um sistema de aquisição de dados com interface no computador capaz de conversão analógico-digital e armazenamento das duas respostas de aceleração devem ser fornecidas. Alternativamente, uma placa conversora A/D dentro do computador pode ser usado. A resolução, a taxa de amostragem e a memória devem ser suficientes para calibração conforme a faixa dinâmica. Uma resolução maior ou igual a 10 bits, preferencialmente 12 bits, é usado para a saída do amplificador dos acelerômetros.

Ao abrir o software no computador (Figura 32) fazemos a configuração dos canais A e B onde o Canal A está conectado a saída do amplificador do acelerômetro a ser calibrado e no Canal B está conectado o padrão de referência.

As configurações são basicamente selecionar a leitura dos sinais para o modo de tensão elétrica. Então, devemos nos certificar de que a DAQ esteja corretamente aterrada e que a conexão seja segura.

Figura 32 – Visualização da tela do notebook



Fonte: Autoria própria

Conforme a norma ISO 16063:22, um osciloscópio com dois ou mais canais deve ser fornecido para verificar as formas de onda da aceleração sinais, com uma faixa de frequência mínima de DC a 1 MHz. Filtros analógicos, aplicados aos sinais de aceleração para evitar *aliasing* que ocorre quando um osciloscópio não amostra o sinal rápido o suficiente para construir um registro preciso da forma de onda. Devem ter uma magnitude e resposta de fase em função da frequência que é apropriado para cumprir com a incerteza tolerável de medição. Este requisito também deve ser cumprido para a filtragem digital em de acordo com os procedimentos de processamento de dados. A aquisição de dados deve começar abaixo ou em um tempo $1 \times T$ antes do evento de choque, e terminar mais tarde ou em $1 \times T$ após o evento de choque, onde T é a duração do pulso de choque conforme definido na

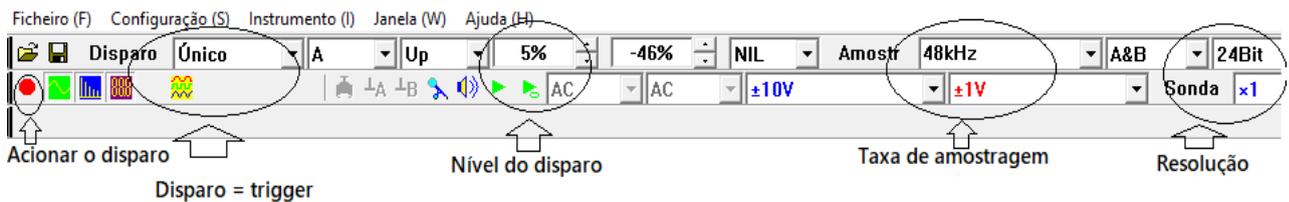
Devemos ajustar a escala vertical para o modo tensão, selecionando o canal apropriado no osciloscópio correspondente ao amplificador conectado. Ajustando a escala vertical (tensão) do canal para que o pulso de meia onda seja claramente visível na tela. Podemos fazer isso usando o botão "VOLTS/DIV" para o Canal A – ajustamos 1 V/div tendo 10V de range no gráfico e para o Canal B do padrão 100 mV/div tendo 500mV de range. Devemos sempre nos atentar se a amplitude do pulso de meia onda está dentro da faixa adequada do osciloscópio para evitar distorções ou saturação.

Devemos ajustar a escala horizontal para tempo para que possamos visualizar a duração completa do pulso de meia onda. Usando o botão "TIME/DIV" ou similar para

ajustar a escala horizontal do osciloscópio usamos a configuração de 1ms/div tendo 10 ms de visualização no gráfico.

Devemos nos certificar de que a taxa de amostragem esteja configurada para capturar detalhes suficientes do pulso de meia onda. A taxa amostragem deve ser definida de modo de que a aquisição de frequência mais alta seja menor que a metade a taxa de amostragem. A taxa utilizada foi de 48kHz (Figura 33).

Figura 33 – Configuração do osciloscópio no software



Fonte: Autoria própria

Para o acionamento do gatilho ou trigger configuramos a função de acionamento (disparo) no canto superior esquerdo da tela do osciloscópio para sincronizar a leitura com o início do pulso de meia onda.

Escolhemos a fonte de acionamento apropriada (por exemplo, o canal B por ser o canal de referência que estamos usando) e definimos o nível de acionamento do nível de disparo de 5% do valor da escala selecionada.

Conforme a norma ISO 16063:22 Antes de realizar o choque, é importante medir quaisquer ruídos mecânicos ou elétricos. Esses valores devem ser suficientemente baixos para garantir a precisão da calibração. Caso os sinais de saída do Acelerômetro de referência e do acelerômetro em calibração sejam filtrados eletricamente, as frequências de corte dos filtros passa-baixa e, se houver, passa-alta devem ser escolhidas de forma a minimizar as interferências causadas pela filtragem nos resultados da calibração.

Depois de tudo configurado vamos acionar o disparo e começar com a excitação do pêndulo.

4.3.3 Geração do choque no pêndulo

A série de figuras a seguir (Figura 34) mostra 4 cenas tiradas de um único vídeo, que mostra o processo de energização do pêndulo, fazendo com que o pêndulo seja elevado para uma posição inicial, sendo assim, a energia potencial acumulada no pêndulo depende da altura a que é elevado e da massa do pêndulo. O pêndulo é liberado de sua posição inicial, permitindo que ele caia livremente.

A energia potencial do pêndulo é convertida em energia cinética à medida que ele ganha velocidade durante a queda. O pêndulo atinge o bate estaca onde estão fixados o acelerômetro padrão e o acelerômetro em calibração. A velocidade e a energia do pêndulo são transferidas para os acelerômetros.

Figura 34 – Transferência de choque para o pêndulo



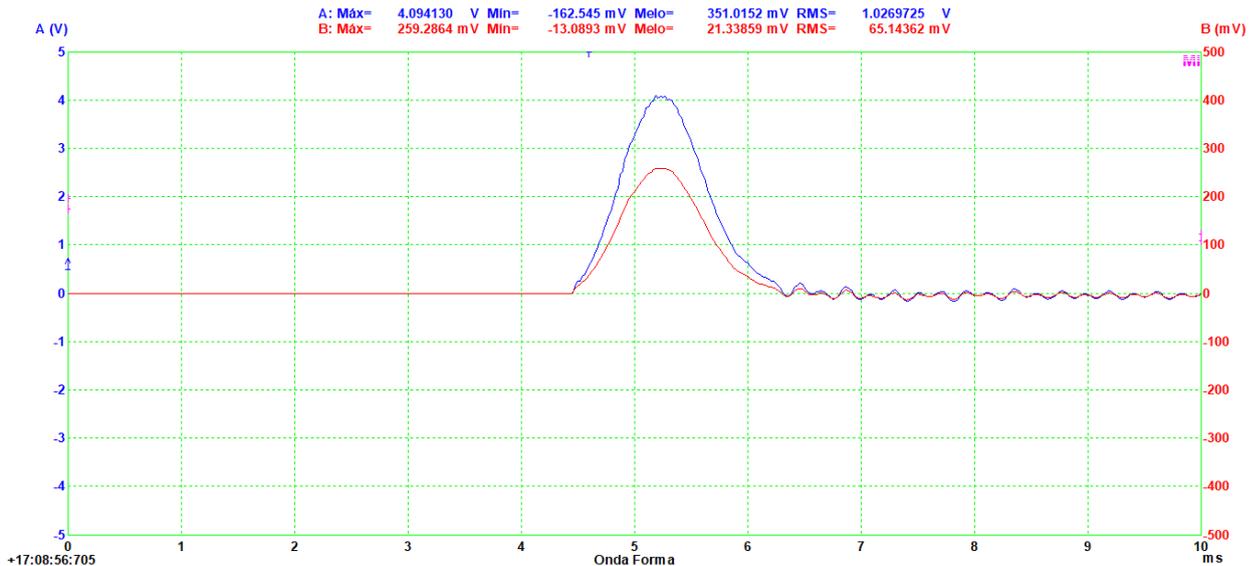
Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS DADOS

5.1 Análise dos pulsos obtidos com o choque

Observamos na Figura 37 que os valores de pico de tensão obtidos para os acelerômetros foram de 4,094 V para o canal A – (Item em calibração) e 259,28mV para o canal B – (Acelerômetro Padrão)

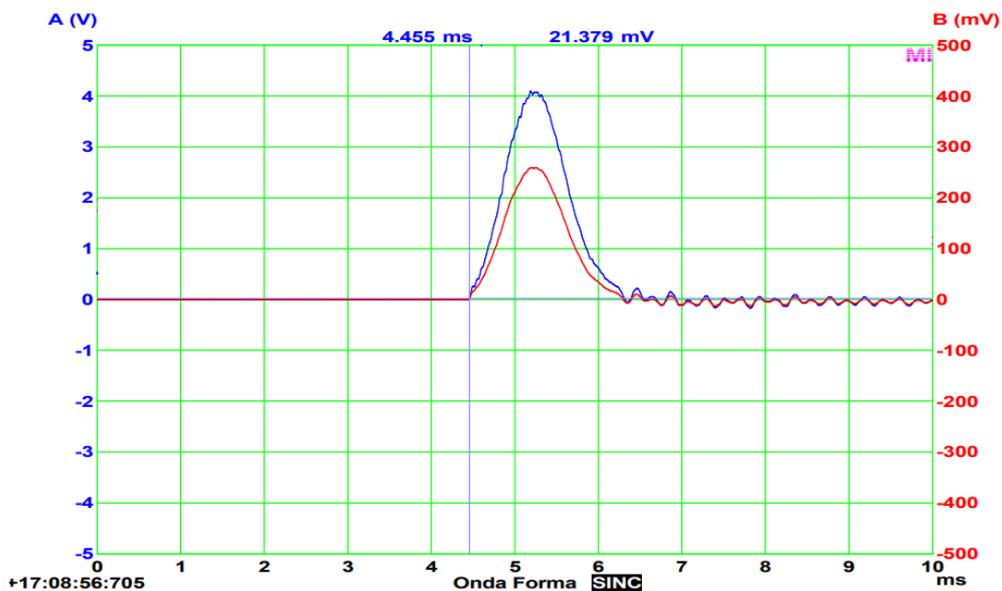
Figura 36 – Tela do software depois da aquisição do primeiro choque de meia onda



Fonte: Autoria própria

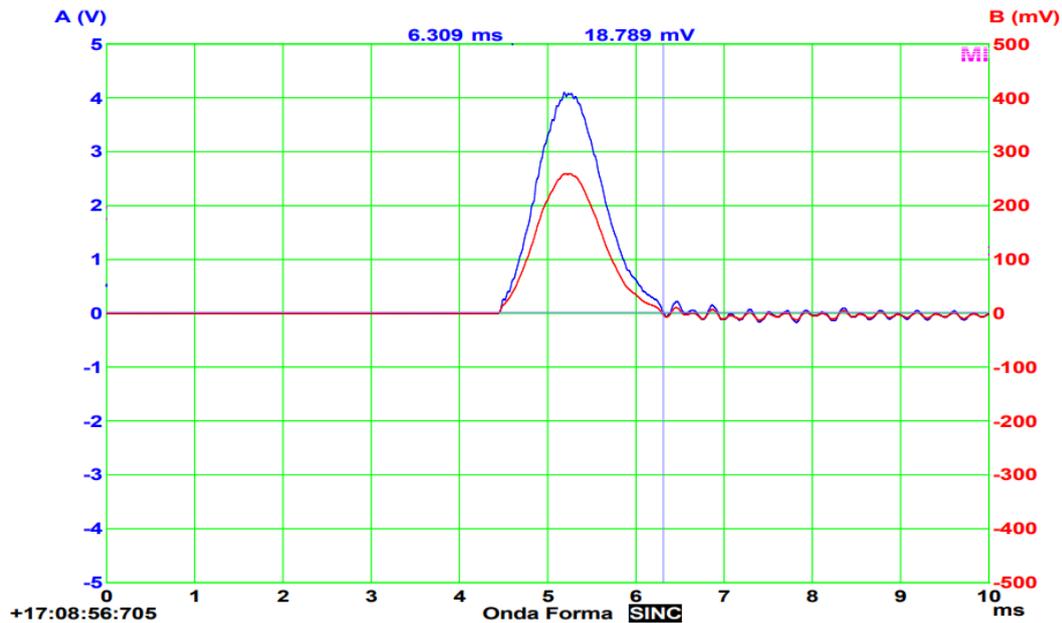
Agora vamos analisar o período do choque de meia onda, usando o cursor do osciloscópio podemos medir o delta T entre o início (Figura 37) e o fim (Figura 38) do choque de meia onda.

Figura 37 – Medição da subida do choque de meia onda



Fonte: Autoria própria

Figura 38 – Medição da descida do choque de meia onda



Fonte: Autoria própria

Temos 4,455 ms (Figura 37) para a subida e 6,309 ms (Figura 38) para a descida do pulso, sendo assim o delta T é igual a 1,854 ms.

Podemos se dizer que basicamente os valores adquiridos são o suficiente para entregarmos dados consistentes a um ponto de calibração do acelerômetro, porém a norma menciona algumas acelerações e durações de pulso desejadas para a calibração sendo, sendo assim seguiremos os mandamentos da norma.

5.2 Análise das acelerações e durações de pulso preferidas

Os valores nominais de aceleração (valores de pico) e duração do pulso de choque devem ser preferencialmente escolhidos entre a seguinte série.

a) Aceleração, em metros por segundo ao quadrado [m/s^2]:

100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000 m/s^2

b) Duração do pulso de choque, em milissegundos:

0,05; 0,07; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5; 8 ms

Como sabemos o pêndulo tem suas limitações em questões de amplitude e período do pulso, sendo assim, iremos calibrar o acelerômetro nos pontos sugeridos na norma respeitando as limitações do sistema de pêndulo que são de 8 ms a 100 m/s^2 . 3 ms a 1 500 m/s^2 . Os pontos seleccionados são de 100, 200, 500, 1 000 e 1500 m/s^2 variando os períodos de 3 a 8 ms. Totalizando 5 pontos de amplitude e frequência, porém decidimos adquirir dois pulsos para cada ponto para cálculos de repetibilidade,

sendo assim, temos 10 pontos de medição adquiridos (Tabela 7).

Tabela 7 – Dados adquiridos durante a calibração

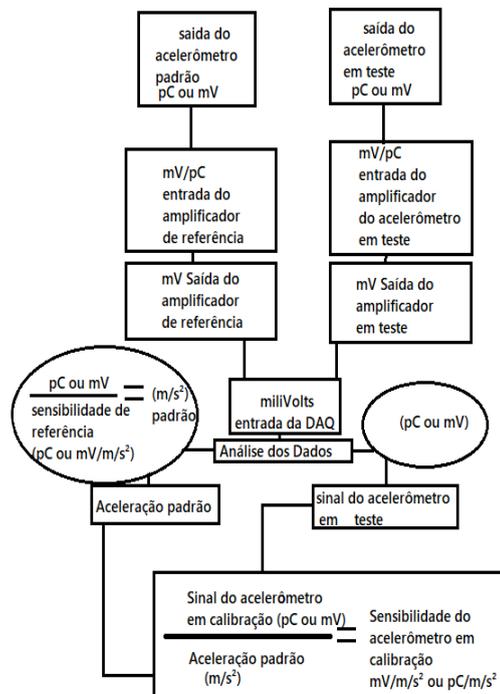
| Acelerômetro padrão (mV) | Acelerômetro em calibração (mV) | período inicial (ms) | período final (ms) |
|--------------------------------|--|----------------------------|--------------------------|
| 19,9635 | 316,265 | 3,636 | 7,526 |
| 20,7448 | 328,596 | 3,662 | 7,475 |
| 42,4153 | 671,391 | 3,948 | 7,198 |
| 44,5764 | 705,324 | 3,688 | 6,626 |
| 99,4954 | 1564,257 | 4,245 | 6,724 |
| 107,6235 | 1695,256 | 4,262 | 6,637 |
| 211,9695 | 3342,738 | 4,377 | 6,377 |
| 215,4016 | 3398,746 | 4,417 | 6,312 |
| 303,7394 | 4779,727 | 4,414 | 6,247 |
| 304,0969 | 4786,909 | 4,436 | 6,311 |

Fonte: Autoria própria

5.3 Cálculo da sensibilidade do acelerômetro

A seguir temos o Fluxograma para o cálculo da sensibilidade (Figura 39):

Figura 39 – Fluxograma do cálculo da sensibilidade



Fonte: Autoria Própria

5.4 Certificado de calibração

Conforme a norma 16063:22, devemos seguir algumas regras para emitir o certificado de calibração.

Ao relatar os resultados da calibração, é importante incluir algumas informações relevantes.

Primeiramente, é necessário mencionar as condições ambientais, como a temperatura do ar ambiente durante o processo de calibração.

Em seguida, é preciso descrever a técnica de montagem utilizada, informando o material da superfície onde o transdutor foi montado, o torque aplicado na montagem (se houver adaptadores), o uso de óleo ou graxa (se utilizado), a fixação dos cabos e a orientação do transdutor (vertical ou horizontal).

Por fim, os resultados da calibração devem ser apresentados, incluindo o valor de pico e a duração do pulso de choque, os valores de sensibilidade do acelerômetro em calibração ao choque e a incerteza expandida da medição com o fator de cobertura k . Essas informações completas garantem a clareza e precisão do relatório de calibração.

A Figura 40 mostra o certificado de calibração construído com o processo de calibração exposto neste trabalho..

O detalhamento dos métodos de Cálculo da sensibilidade do acelerômetro consta do anexo B.

Figura 40 - Certificado de Calibração

Certificado de Calibração

Informações do sensor

Modelo: 4383
 N° de Série: 32617
 Fabricante: Bruel & Kjaer
 tipo: Piezoelétrico

Especificações do Sensor

Frequência de ressonância: 25,8 kHz
 Faixa de Frequência: 0.1 – 8400 Hz
 Sensibilidade Nominal: 3,16 pC/m/s²
 peso: 17 gramas
 choque máximo: 5000 gn

Condições ambientais

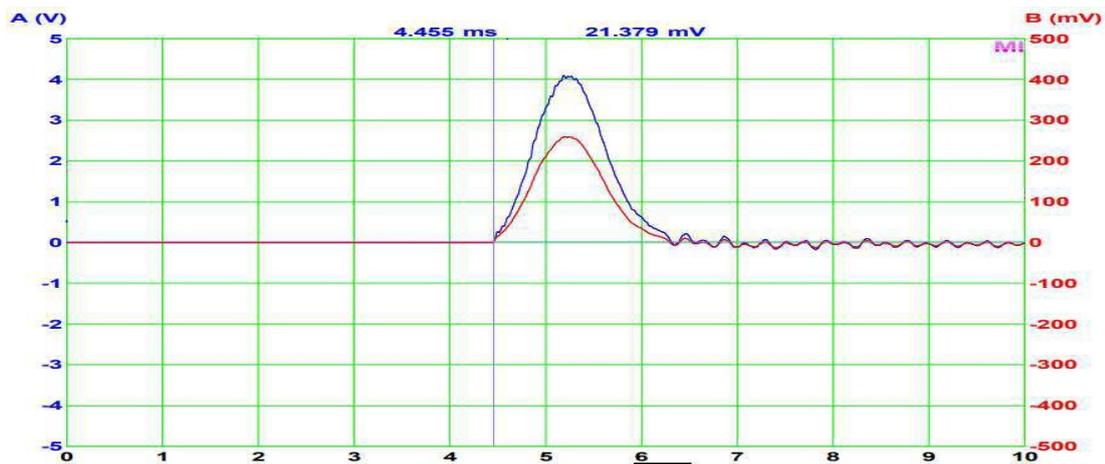
Temp: 23,1 °C
 UR%: 65,2 %

Rastreabilidade

Acelerômetro Padrão - Certificado n° 4-27-202092245AM - PCB Piezotronics

Calibração e Resultados

Pulso de choque aqüstado durante a calibração



Técnico Executante
Heitor Presser
Data de
calibração:
29/05/2023

página 1/2

Calibração e Resultados

Padrão: Acelerômetro de
Referência Item: Acelerômetro
em calibração Desvio: Valor do
item - Calculado
U: Incerteza de Medição

Sensibilidade calculada: $B = 3,212 \text{ pC/m/s}^2$

| Padrão (m/s^2) | Item (mV) | Calculado (mV) | Desvio | | Sensibilidade (pC/m/s^2) | Frequência (Hz) | U (%) |
|------------------------------|--------------|-------------------|---------|-------|--|--------------------|----------|
| | | | (mV) | (%) | | | |
| 97,5 | 315,18 | 313,13 | 2,0564 | 0,66 | 3,234 | 128,5 | 2,00 |
| 101,3 | 327,47 | 325,38 | 2,0906 | 0,64 | 3,233 | 131,1 | |
| 207,1 | 669,10 | 665,28 | 3,8120 | 0,57 | 3,231 | 153,8 | |
| 217,6 | 702,91 | 699,18 | 3,7322 | 0,53 | 3,230 | 170,2 | |
| 485,8 | 1558,91 | 1560,58 | -1,6754 | -0,11 | 3,209 | 201,7 | |
| 525,5 | 1689,46 | 1688,07 | 1,3865 | 0,08 | 3,215 | 210,5 | |
| 1035,0 | 3331,31 | 3324,74 | 6,5700 | 0,20 | 3,219 | 250,0 | |
| 1051,7 | 3387,12 | 3378,57 | 8,5540 | 0,25 | 3,221 | 263,9 | |
| 1483,0 | 4763,38 | 4764,15 | -0,7639 | -0,02 | 3,212 | 272,8 | |
| 1484,8 | 4770,54 | 4769,75 | 0,7861 | 0,02 | 3,213 | 266,7 | |

A Sensibilidade do acelerômetro em calibração foi determinada pelo método matemático de regressão linear $Y = BX$ $Y = \text{Item}$ $X = \text{aceleração padrão}$



Técnico

Executante

Heitor Presser

Data de

calibração:

29/05/2023

página 2/2

Fonte: Autoria Própria

5.5 Incerteza de medição

A incerteza de medição em um laboratório de calibração é uma estimativa da faixa de variação dos resultados de medição que reflete a falta de conhecimento completo e absoluto sobre o valor verdadeiro da grandeza que está sendo medida. Ela é uma medida da imprecisão associada às medições e leva em consideração diversos fatores, como erros sistemáticos, erros aleatórios, limitações dos instrumentos de medição e variações das condições ambientais.

A incerteza de medição é expressa como um intervalo de confiança e é determinada através de análises estatísticas e cálculos utilizando métodos e procedimentos estabelecidos. Ela fornece uma indicação da confiabilidade dos resultados de medição e permite que os usuários dos serviços de calibração compreendam a magnitude da incerteza associada às medições realizadas pelo laboratório.

É importante ressaltar que a incerteza de medição não representa erros inevitáveis ou falhas no processo de calibração. Pelo contrário, ela é uma parte fundamental da avaliação da qualidade das medições realizadas pelo laboratório e contribui para a tomada de decisões informadas com base nos resultados obtidos.

5.5.1 Descrição dos componentes da incerteza

A seguir estão listadas as fontes de incerteza envolvidas nas medições por comparação, juntamente com suas magnitudes estimadas. As incertezas são convertidas para desvio padrão e apresentadas como contribuição para a incerteza, utilizando a distribuição adequada. Todos os valores calculados são incertezas padronizadas ($k = 1$).

A. Calibração do acelerômetro de referência: A incerteza declarada na calibração do acelerômetro de referência é de 0,5% com um nível de confiança de 95,45% ($k = 2$). A distribuição de probabilidade para essa fonte é normal.

B. Movimento relativo: Estimativa de interferência do movimento relativo entre os sensores, a base e o dispositivo compartilhado em relação ao valor da tensão de pico medida, inferior a 0,25%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

C. Movimento transversal ou rotação: Efeito transversal, balanço, cabo e rotação do sensor durante o momento do choque do martelo na bigorna, estimado como inferior a 0,15%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

D. Influência da medição de temperatura: Variação de temperatura durante a calibração, assumida como 3 °C em relação a uma temperatura de 23 °C. Incerteza estimada para a sensibilidade do acelerômetro de referência é de 0,36%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

E. Influência da deriva: Deriva do acelerômetro de referência ao longo do tempo, estimada como inferior a 0,15%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

F. Não-linearidade do transdutor na medição: Não-linearidade do acelerômetro de referência, estimada como inferior a 0,24%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

G. Influência da base strain na medição no acelerômetro em calibração: Estimada como inferior a 0,20%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

H. Movimento transversal ou rotação no acelerômetro em calibração: Efeito transversal, balanço, cabo e rotação do sensor durante o momento do choque do martelo na bigorna, estimado como inferior a 0,15%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

I. Efeito da deformação do cabo no acelerômetro em calibração: Efeito da deformação ou esforço excessivo do cabo durante o choque, estimado como inferior a 0,10%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

J. Medição de temperatura no acelerômetro em calibração: Variação de temperatura durante a calibração, assumida como 3 °C em relação a uma temperatura de 23 °C. Incerteza estimada para a sensibilidade do acelerômetro DUT é de 0,60%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

K. Resposta em frequência no acelerômetro em calibração: Considerada como zero, pois a resposta em frequência de diferentes durações de pulso resultará em sensibilidades diferentes da sensibilidade de vibração convencional a 160 Hz. Portanto, não é considerada no cálculo da incerteza. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

L. Não-linearidade do amplificador de referência: Estimada como inferior a 0,10%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

M. Não-linearidade do amplificador do acelerômetro em calibração: Estimada como inferior a 0,10%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

N. Sensibilidade de calibração do amplificador de referência: Incerteza de medição para o amplificador de referência é de 0,15% para frequências de 10 Hz a 10 kHz. A distribuição de probabilidade para essa fonte é normal.

O. Sensibilidade de calibração do amplificador do acelerômetro em calibração: Incerteza de medição para o amplificador do acelerômetro em calibração é de 0,15% para frequências de 10 Hz a 10 kHz. A distribuição de probabilidade para essa fonte é normal.

P. Resposta de frequência relativa: Estimada como inferior a 0,10%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

Q. Temperatura no amplificador de referência: Variação de temperatura durante a calibração, assumida como 3 °C em relação a uma temperatura de 23 °C. Incerteza do ganho nos amplificadores fornecida pelo fabricante como menor que 0,03%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

R. Temperatura no amplificador do acelerômetro em calibração: Variação de temperatura durante a calibração, assumida como 3 °C em relação a uma temperatura de 23 °C. Incerteza do ganho nos amplificadores fornecida pelo fabricante como menor que 0,03%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

S. Distorção no valor da tensão de pico: Estimada como inferior a 0,20%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

T. Patamar do zero: Estimado como inferior a 0,20%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

U. Ruído na medição: Estimado como inferior a 0,10%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

V. Resolução do amplificador: Assumindo resolução de 4 dígitos significativos para o cálculo, onde estimada como inferior a 0,10%. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

W. Influência na VR - efeito residual na medição: Estimada como inferior a 0,05%, por exemplo, efeito aleatório em medições repetidas e desvio padrão experimental do resultado aritmético. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

X. Influência na VR - efeito operacional na medição: Estimada como inferior a 0,05%, por exemplo, instabilidade das leituras, influência do operador e do método. A

aplicação deste componente amplia a segurança sobre as variações possíveis no laboratório. A distribuição de probabilidade para essa fonte é retangular.

Faixa de medição 100 a 1500 (m/s²)

Incerteza de medição calculada - 1,21 (%)

Incerteza de medição reportada – 2,00 (%)

A medição reportada é maior do que a calculada, pois, dando uma margem de erro para a incerteza eliminamos preocupações com componentes ou fatores que não adicionamos nos cálculos ou que são desconhecidos.

A Tabela 8 mostra os valores da incerteza de medição cuja lista de condições se encontra no Anexo A.

Tabela 8 – Tabela do cálculo de incerteza de medições

| Raiz da soma quadrática das incertezas | | fator k | | Incerteza expandida multiplicada pelo fator | | | | Incerteza declarada | |
|--|--|-----------|---------|---|---------|----|-----------------------------|---------------------|---------------------------|
| 0,6054 | | 2,00 | | 1,21 | | | | 2,0 | |
| ID | Apresentação | Incerteza | Unidade | Distribuição de probabilidade | Divisor | Ci | componente para a incerteza | Grau de liberdade | REFERÊNCIAS |
| A | Calibração do acelerômetro de referência | 0,50 | % | normal | 2,00 | 1 | 0,2500 | infinito | Certificado de calibração |
| B | Movimento relativo | 0,25 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,1443 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| C | Movimento transversal ou rotação | 0,15 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0866 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| D | Influência da temperatura na medição | 0,36 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,2078 | infinito | Fabricante |
| E | Influência da deriva da referência | 0,15 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0866 | infinito | Fabricante |
| F | Não-linearidade do transdutor de referência | 0,24 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,1386 | infinito | Fabricante |
| G | Influência da base strain na medição | 0,20 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,1155 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| H | Movimento transversal ou rotação do AEC | 0,15 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0866 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| I | Influência da deformação do cabo no AEC | 0,10 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0577 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| J | Influência da temperatura na medição no AEC | 0,60 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,3464 | infinito | Análise em outros modelos |
| K | Resposta em frequência no AEC | 0,00 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0000 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| L | Não-linearidade do amplificador de referência | 0,10 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0577 | infinito | Fabricante |
| M | Não-linearidade do amplificador do AEC | 0,10 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0577 | infinito | Fabricante |
| N | Calibração do amplificador da referência | 0,15 | % | normal | 2,00 | 1 | 0,0750 | infinito | Certificado de calibração |
| O | Calibração do amplificador do AEC | 0,15 | % | normal | 2,00 | 1 | 0,0750 | infinito | Certificado de calibração |
| P | Influência da resposta de frequência relativa | 0,10 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0577 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| Q | Influência da temperatura no amplif. referênci | 0,09 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0520 | infinito | Fabricante |
| R | Influência da temperatura no amplif. AEC | 0,09 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0520 | infinito | Fabricante |
| S | Influência da distorção no valor do pico | 0,20 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,1155 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| T | Influência do patamar do zero | 0,20 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,1155 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| U | Influência do ruído na medição | 0,10 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0577 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| V | Influência da resolução do amplificador | 0,10 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0577 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| W | Influência do efeito residual na medição | 0,05 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0289 | infinito | ISO 16063-22:2005 |
| X | Influência do efeito operacional na medição | 0,05 | % | retangular | 1,73205 | 1 | 0,0289 | infinito | ISO 16063-22:2005 |

(AEC) Acelerômetro em Calibração

6 CONCLUSÃO

Após a construção, teste e comprovação de que o sistema de calibração de acelerômetros por choque usando um pêndulo funciona, podemos chegar a algumas conclusões importantes.

A principal conclusão é que o sistema de calibração por choque com o pêndulo é eficiente na tarefa de calibrar os acelerômetros. Ele é capaz de fornecer medidas precisas e confiáveis das sensibilidades dos acelerômetros, permitindo que eles sejam corretamente utilizados em diversas aplicações. A partir da comprovação de que o sistema funciona, podemos afirmar que ele apresenta um alto nível de precisão e que as medidas obtidas são consistentes e próximas aos valores de sensibilidade descritos pelo fabricante dos acelerômetros calibrados. O sistema de calibração demonstrou ser estável, fornecendo resultados consistentes e reproduzíveis. Isso é fundamental para garantir que as medidas obtidas sejam confiáveis e possam ser utilizadas com segurança em aplicações que dependem de acelerômetros calibrados.

A comprovação do funcionamento do sistema confirma a viabilidade do método de calibração por choque utilizando um pêndulo. Isso significa que esse método pode ser utilizado de forma prática e eficaz para calibrar acelerômetros em diferentes contextos, desde laboratórios de pesquisa até indústrias que dependem desses dispositivos.

Por fim, a conclusão final é que o sistema de calibração por choque usando o pêndulo possui um potencial de aplicação amplo. Ele pode ser utilizado em diversas áreas que requerem acelerômetros calibrados, como engenharia estrutural, testes de impacto, análise de vibração, monitoramento de saúde estrutural, entre outros.

Essas conclusões reforçam a importância e a eficácia do sistema de calibração, fornecendo uma base sólida para a utilização desse método e promovendo avanços nas áreas que dependem de medidas precisas de aceleração.

7 PROPOSTAS FUTURAS

Há diversas propostas futuras que podem ser consideradas para esse projeto de graduação entre elas seria focar no aprimoramento da precisão do sistema de calibração. Isso pode ser alcançado por meio de uma análise detalhada dos fatores que influenciam a precisão e da implementação de medidas corretivas. Por exemplo, seria válido realizar um estudo sobre o atrito e a resistência do pêndulo, visando desenvolver estratégias para minimizar os efeitos de vibrações laterais.

Outra proposta seria automatizar o processo de calibração de choque por pêndulo. Isso poderia envolver a integração de sensores e atuadores para controlar e monitorar o movimento do pêndulo, além da implementação de programação para otimizar o processo de calibração. Essa automatização traria maior eficiência e precisão ao sistema, reduzindo a necessidade de intervenção humana e permitindo uma calibração mais rápida e confiável.

Essas são apenas algumas propostas futuras que podem ser consideradas para o projeto de graduação sobre um sistema de calibração de choque por pêndulo. Cabe aos estudantes e pesquisadores envolvidos no projeto avaliar sua viabilidade e escolher as abordagens mais adequadas para atingir os objetivos propostos.

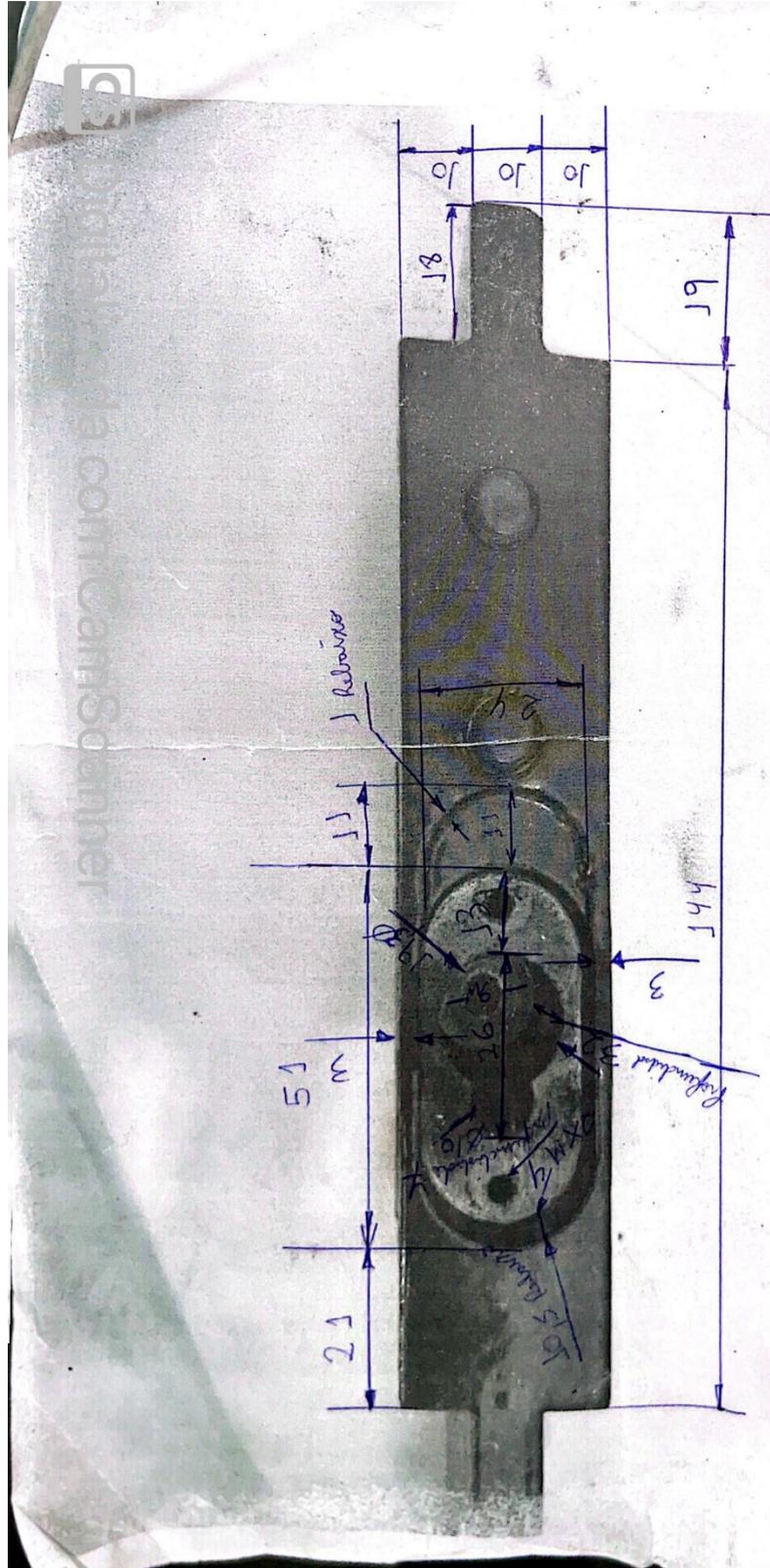
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

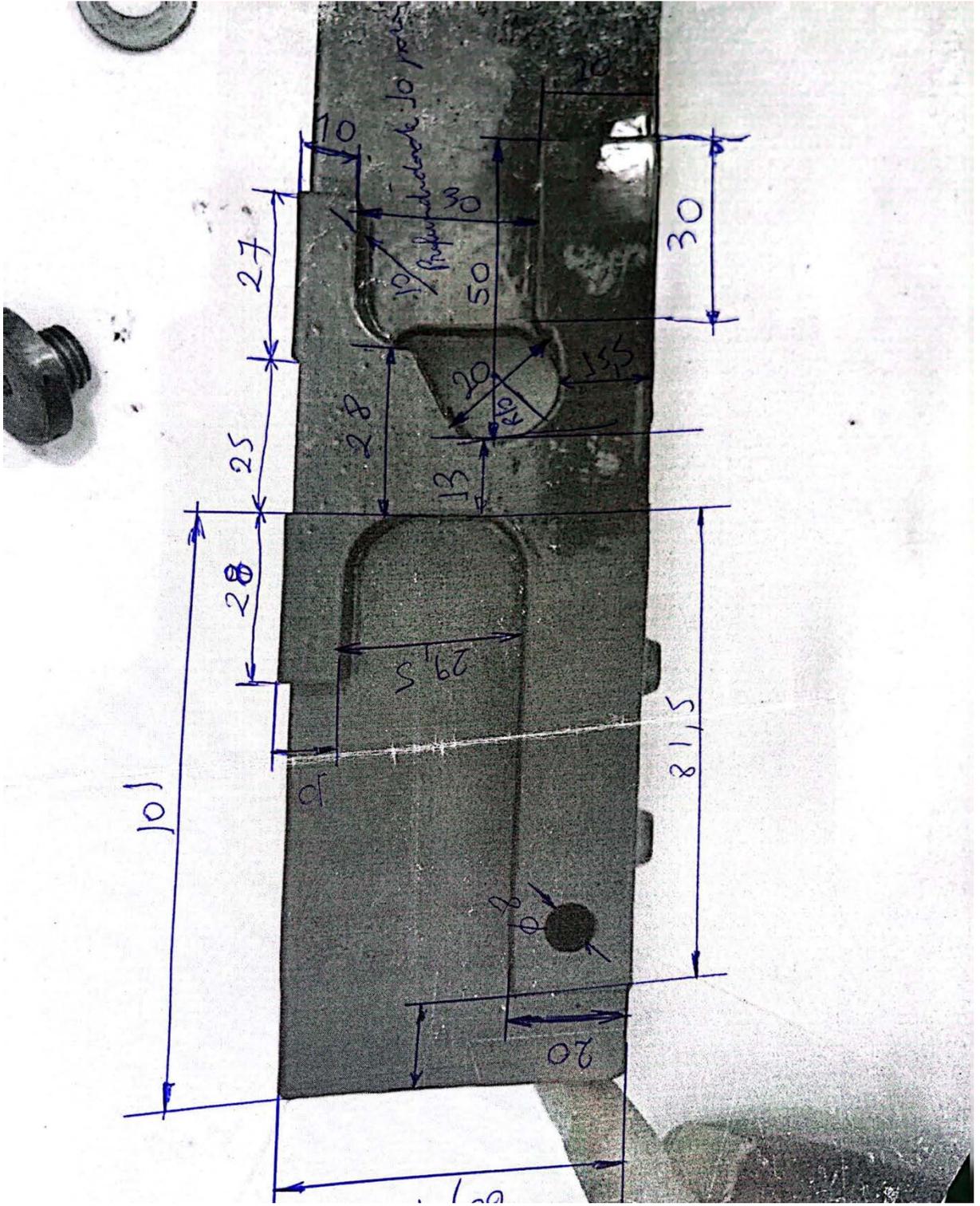
- [1] **Orgãos Responsáveis pelo Teste de Impacto Automotivo no Mundo**; disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Crash_test. Acesso em 25 out. 2022, 15h40m45.
- [2] INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM)**. 3ª ed, Rio de Janeiro, dez. 2008.
- [3] ISO. **ISO 16063-1 Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers – Part 1: Basic concepts**. Switzerland: International Organization for Standardization, oct. 1998.
- [4] ISO. **ISO 16063-22 Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers – Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer**. Switzerland: International Organization for Standardization, 2005.
- [5] Shelby, Simon; **How Many People Die From Car Accidents Each Year?";** disponível em: <https://www.forbes.com/advisor/legal/auto-accident/car-accident-deaths/#:~:text=More%20than%2046%2C000%20people%20die,12.4%20deaths%20per%20100%2C000%20inhabitants>. Acesso em 27 out. 2022, 13h28m35.
- [6] World Health Organization, **World Road Safety Global Status Report on Road Safety**, 2015.
- [7] National Bureau of Statistics of China, 2015, [EB/OL] [http:// data.stats.gov.cn/index.htm](http://data.stats.gov.cn/index.htm).
- [8] D. C. Viano, A. I. King, J. W. Melvin, and K. Weber, **Injury biomechanics research: an essential element in the prevention of trauma**, *Journal of Biomechanics*, vol. 22, no. 5, pp. 403– 417, 1989.
- [9] Bestech; **THE IMPORTANCE OF CALIBRATION IN VIBRATION SENSORS**, disponível em: <https://www.bestech.com.au/blogs/the-importance-of->

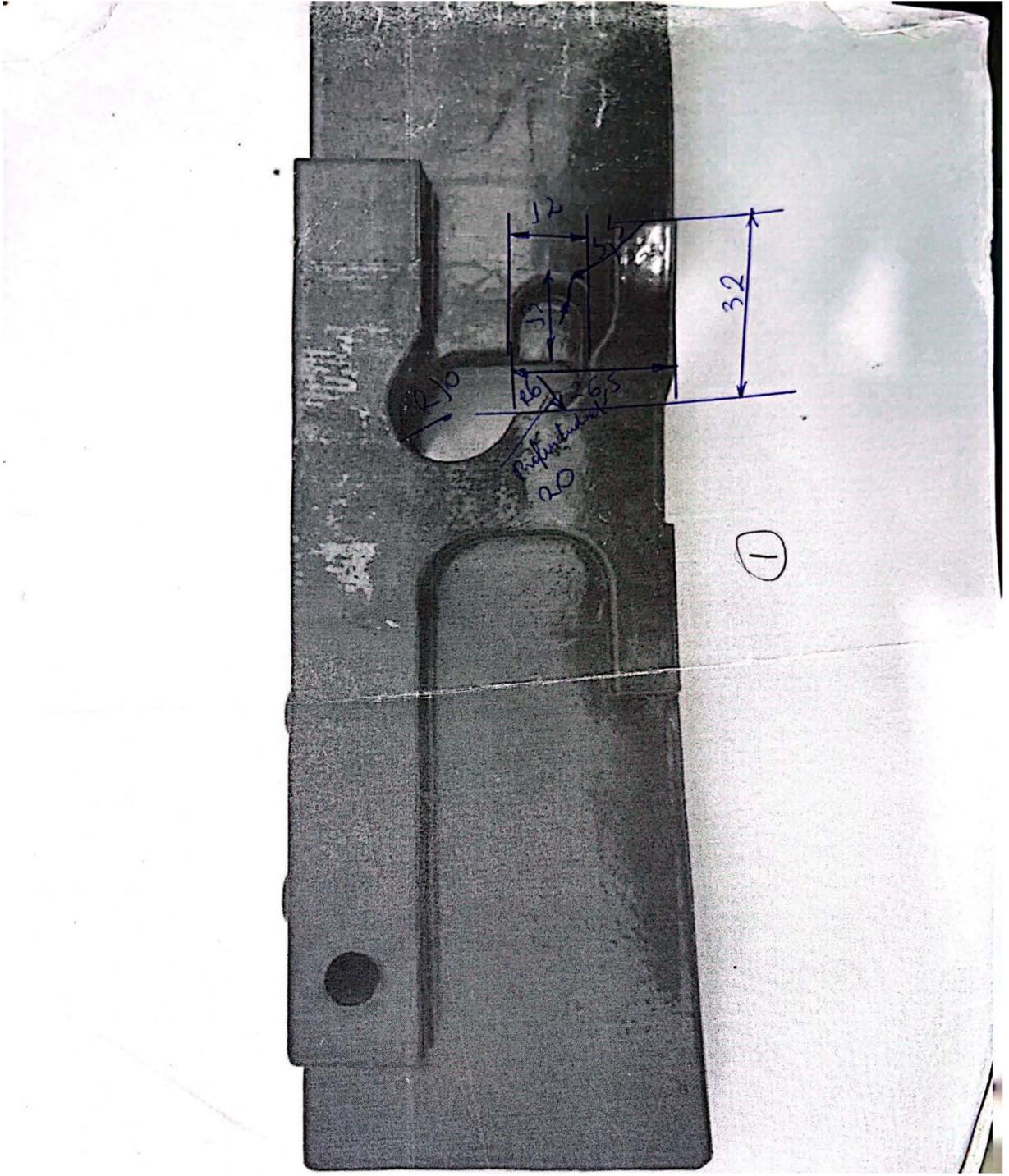
calibration-in-vibration-sensors/. Acesso em 27 out. 2022, 19h20m15.

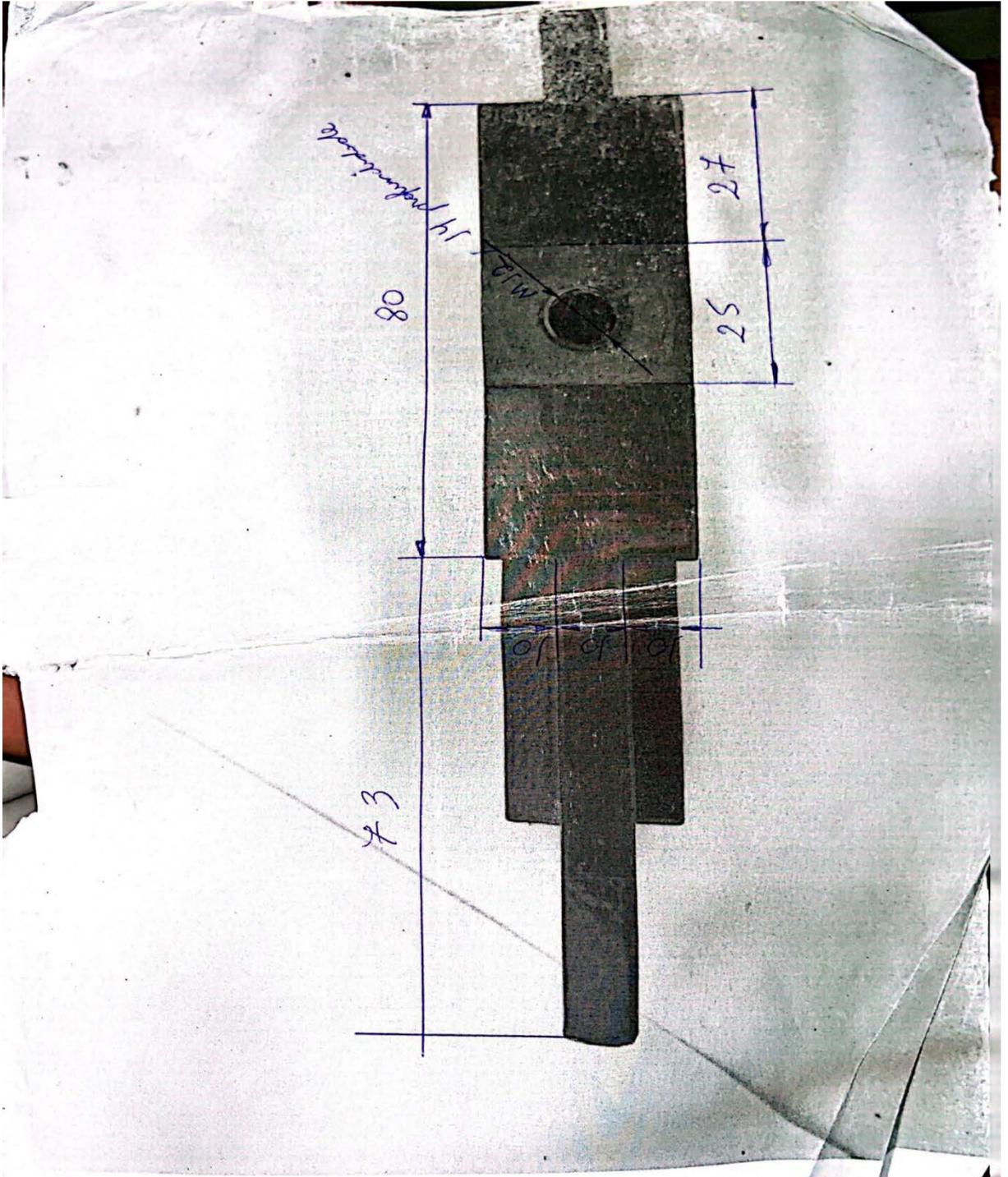
[10] Campos, Ailson Nogueira. **Avaliação Metrológica de um Sistema de Calibração de Acelerômetros por Choque Mecânico** - São José dos Campos, 2010. 104f.

Apêndice A – Croqui do Pêndulo









Anexo A - Condições de incerteza para calibração de choque secundário

A incerteza de medição é uma medida da margem de erro na calibração e é expressa como uma porcentagem relativa. As especificações de incerteza são baseadas em um fator de cobertura que visa garantir uma probabilidade de cobertura de cerca de 95%.

Para alcançar as especificações de incerteza, é importante garantir que a energia gerada pelos modos de ressonância do transdutor ou da máquina de choque durante a calibração seja insignificante em comparação com a energia na faixa de frequência de calibração. Os testes de ressonância devem ser realizados de acordo com as diretrizes estabelecidas.

Para transdutores de alta precisão, como referência ou acelerômetros padrões, é possível obter incertezas menores do que as indicadas. Em comparações interlaboratoriais, os sistemas de calibração de pêndulo, dropball e pistão pneumático obtiveram uma incerteza de medição de 1% para valores de pico de aceleração na faixa de 200 m/s² a 2 000 m/s².

A magnitude do pico de aceleração é expressa em termos da aceleração padrão da gravidade, simbolizada por gn. É importante considerar a menor duração de choque especificada pelo fabricante do transdutor para evitar aumentar a incerteza de medição e evitar danos ao transdutor.

Anexo B - Cálculo da sensibilidade ao choque para calibradores de choque de bigorna

Seleção do valor máximo como valor de pico [4]

Esta versão é aplicável se os valores máximos ($\max\{u_S(t_i)\}$ e $\max\{u_X(t_i)\}$) das duas séries de amostras os valores do sinal de saída representam com precisão suficiente os valores de pico $\{u_S, \text{pico}\}$, $\{u_X, \text{pico}\}$ após passagem baixa filtragem.

Os sinais de saída com filtro passa-baixa devem representar uma curva suave com baixa ou nenhuma distorção por ruído ou oscilação devido a qualquer ressonância (ringing), etc. O zumbido pode ser causado por qualquer ressonância no choque máquina ou por excitação da ressonância do transdutor de referência e/ou transdutor de teste pelo choque espectro.

A sensibilidade ao choque do transdutor deve ser calculada pelo processamento de dados, conforme indicado nas etapas a seguir

a) Filtre a série de valores de saída do transdutor padrão amostrados $\{u_S, D(t_i)\}$ usando um filtro passa-baixa digital algoritmo com parâmetros adequados para suprimir a contaminação do sinal, como distorção e ruído de alta frequência, sem afetar as informações de medição. O resultado é uma série de sinais “suaves” valores $\{u_S(t_i)\}$.

Um filtro com resposta de magnitude plana máxima, por ex. um filtro passa-baixa Butterworth recursivo de 4ª ordem é adequado para esta finalidade, desde que seja feita uma compensação para efeitos de fase não lineares.

b) Da série $\{u_S(t_i)\}$ dos valores de saída do transdutor filtrados, selecione o valor máximo, $\max\{u_S(t_i)\}$, enquanto o valor de pico u_S, pico da saída do transdutor.

Se houver um deslocamento de zero no sinal, o ponto zero imediatamente antes do choque e o ponto zero deslocado imediatamente após o choque devem ser conectadas por uma linha reta. Esta linha é a base para a determinação da saída. Um deslocamento zero máximo de 1% em relação ao valor de pico da saída é aceitável. Se o deslocamento de zero for maior que 1%, então seu efeito na incerteza de medição deve ser levado em consideração e o valor do deslocamento zero deve ser relatado.

Em algumas máquinas de choque, o sinal após o choque é contaminado com resposta ressonante (por exemplo, ringing).

Neste caso, o ponto zero imediatamente antes do choque pode ser tomado como base para a determinação da saída, e o possível efeito no resultado da calibração deve ser levado em consideração no cálculo da incerteza.

- c) Proceda como na etapa a), mas para o transdutor de teste, com valores de saída “distorcidos” $\{u_{X,D}(t_i)\}$. O resultado de filtragem é uma série de valores “suaves” denotados por $\{u_X(t_i)\}$.
- d) proceda como na etapa b), mas para o transdutor de teste. O valor de pico máximo selecionado é considerado como o $u_{X, \text{pico}}$.
- e) Calcule a sensibilidade ao choque S_{sh} a partir dos valores $u_{S, \text{peak}}$, $u_{X, \text{peak}}$ obtidos nos passos b) e d) usando a fórmula com a sensibilidade do transdutor de referência

$$S_{sh} = S_S \frac{u_{X, \text{peak}}}{u_{S, \text{peak}}}$$

Para simplificar, o índice X é omitido no símbolo da sensibilidade do transdutor de teste: $S_{sh} = S_{X, sh}$.

Quando os resultados da calibração são relatados, a incerteza expandida da medição na calibração deve ser calculada e relatada de acordo com o Anexo A.

Se um filtro analógico de dois canais apropriado for aplicado antes da amostragem dos sinais de saída dos transdutores, a filtragem digital pode ser dispensada.

Aproximação polinomial (domínio do tempo) [4]

Esta versão é aplicável se os valores máximos ($\max\{u_S(t_i)\}$ e $\max\{u_X(t_i)\}$) das duas séries de amostras os valores do sinal de saída representam de forma suficientemente precisa e direta os valores de pico $\{u_{S, \text{peak}}\}$, $\{u_{X, \text{peak}}\}$.

Esta versão é recomendada se os sinais de saída amostrados dos transdutores de referência e teste, $\{u_S(t_i)\}$ e $\{u_X(t_i)\}$ são distorcidos por ruído ou oscilação devido a qualquer ressonância (toque), etc., e se nenhuma preferência for dada à filtragem digital de acordo com a versão 1 ou à transformada de Fourier de acordo com a versão 3.

Alguns motivos para preferir a versão 2 são que o número de valores amostrados não é suficiente para aplicar

filtragem para a versão 1, ou que a versão 3 é muito demorada.

A sensibilidade ao choque do transdutor deve ser calculada pelo processamento de dados nas seguintes etapas a) a g).

- a) Defina um intervalo de aproximação em torno dos valores de pico estimados da série amostrada da saída $\{u_S(t_i)\}$ do transdutor de referência.

Da série $\{u_S(t_i)\}$, selecione todos os valores que excedem um valor $\{u_S(t_i)\} = \alpha \cdot u_{S, \text{pico}}$. De preferência, $\alpha = 0,9$ (primeira escolha) ou $\alpha = 0,95$ é escolhido. Os valores selecionados formam a série $\{u_S(t_i)\}$ aplicativo a ser aproximado.

b) Aproxime a série $\{u_S(t_i)\}$ por um polinômio de aproximação de segunda ordem:

$$u_S(t) = b_{S,2} t^2 + b_{S,1} t + b_{S,0}$$

Calcule as constantes $b_{S,0}$, $b_{S,1}$, $b_{S,2}$ usando o método dos mínimos quadrados gaussianos.

c) O valor de pico $u_{S,peak}$ é obtido das constantes $b_{S,0}$, $b_{S,1}$, $b_{S,2}$ usando a fórmula

$$u_{S,peak} = b_{S,0} - \frac{b_{S,1}^2}{4 b_{S,2}}$$

d) Execute a etapa a) para o transdutor de teste, tendo valores de saída $\{u_X(t_i)\}$. Os valores selecionados formam a série $\{u_X(t_i)\}$ aplicativo.

Pode ser apropriado escolher outro valor α diferente daquele escolhido para o transdutor de referência.

e) Execute a etapa b) para o transdutor de teste. As constantes $b_{X,0}$, $b_{X,1}$, $b_{X,2}$ do polinômio de aproximação $u_X(t)$ são obtidos.

f) Execute a etapa c), mas para o transdutor de teste. O valor de pico $u_{X,pico}$ do polinômio de aproximação é obtido.

g) Calcule a sensibilidade ao choque S_{sh} a partir dos valores $u_{S,peak}$, $u_{X,peak}$ obtidos nos passos c) e f), usando Equação (1).

Quando os resultados da calibração são relatados, a incerteza expandida da medição na calibração deve ser calculada e relatada de acordo com o Anexo A.

Sensibilidade [10]

A norma ISO 16063:22 apresenta três métodos para o cálculo da sensibilidade do acelerômetro desconhecido. Nesse capítulo foram analisados dois métodos: o método de seleção do valor máximo de pico e o método de aproximação por polinômio, métodos utilizados no domínio do tempo.

Método de seleção do valor máximo [10]

O método de seleção do valor máximo é aplicado quando o sinal do acelerômetro de referência e o sinal do acelerômetro desconhecido apresentam uma curva com tensão pico bem definido com baixa distorção e ruído. Um filtro digital passa-baixa pode ser utilizado para diminuir o efeito do ruído de alta-frequência e/ou efeito da ressonância da máquina de choque ou excitação da ressonância do acelerômetro de referência ou desconhecido causado

pelo espectro de choque, fenômeno chamado de *ringing*.

A sensibilidade do acelerômetro ao choque é calculada a partir da equação (1).

$$S_{UNK} = \frac{e_{UNK, pico}}{e_{REF, pico}} S_{REF}$$

Equação 1

As constantes $e_{UNK,pico}$ e $e_{REF,pico}$ representam a tensão de pico de saída dos acelerômetros a calibrar e referência respectivamente. O termo S_{REF} representa a sensibilidade do acelerômetro de referência e S_{UNK} representa a sensibilidade do acelerômetro desconhecido.

Aproximação polinomial [10]

O método de aproximação polinomial é recomendado quando as amostras dos sinais de saída dos acelerômetros apresentam distorção devido a ruídos ou oscilações causadas pela ressonância do calibrador de choque.

A sensibilidade ao choque é calculada seguindo os passos abaixo. Primeiramente, é definido um intervalo próximo aos valores de pico das amostras. A série de dados $d_s(t_i)$ consiste em todos os valores que ultrapassam um determinado limite, conforme definido na equação (2).

$$d_s(t_i) = \alpha \cdot e_{s,pico}$$

equação 2

As amostras de tensão do acelerômetro de referência são representadas por $e_{s,pico}$, e é recomendado que a constante α seja inicialmente definida como 0,9 ou 0,95.

O segundo passo consiste em aproximar a série de dados $d_s(t_i)$ por um polinômio de segunda ordem.

$$e_s(t) = b_{s,2} t^2 + b_{s,1} t + b_{s,0}$$

Equação 3

Os coeficientes $b_{s,2}$, $b_{s,1}$ e $b_{s,0}$ devem ser calculados utilizando o método dos mínimos quadrados, conforme estabelecido na norma ISO 16063:22.

O valor de pico é calculado utilizando as constantes encontradas a partir da equação (3).

$$e_{s, \text{pico}} = b_{s,0} - \frac{b_{s,1}^2}{4b_{s,2}}$$

Equação 4

Os mesmos passos realizados para o acelerômetro de referência devem ser repetidos para o acelerômetro desconhecido. Após encontrar os valores de tensão pico ($e_{s,\text{pico}}$) para ambos os acelerômetros, o cálculo da sensibilidade do acelerômetro desconhecido pode ser realizado utilizando a equação (4).

Anexo C - Certificado de Calibração do acelerômetro padrão

| CALIBRATION CERTIFICATE | | | |
|---|---------------------------------------|---|--|
| Primary Calibration | | | |
| By Laser Interferometer | | | |
| IQ Demodulator Method AT-401-22 | | | |
| Date: <u>4/27/2020</u> | Due Date: <u>4/27/2021</u> | Customer: <u>TE Connectivity</u> | |
| Cal Code: <u>CS120 (20Hz to 10kHz)</u> | | <u>PO Box 68355</u> | |
| Technician: <u>John Kessler</u>  | | <u>Harrisburg, PA 17106-8355</u> | |
| ACCELEROMETER | | POWER SUPPLY | |
| Manufacturer: <u>Endevco</u> | Manufacturer: <u>PCB Piezotronics</u> | | |
| Model Number: <u>2270M8</u> | Model Number: <u>443B102</u> | | |
| Serial Number: <u>16199</u> | Serial Number: <u>372</u> | | |
| CONDITION OF UNIT | | TEST CONDITIONS | |
| As Found: <u>In Tolerance</u> | Temperature: <u>75</u> °F (24 °C) | | |
| As Left: <u>No adjustment</u> | Relative Humidity: <u>27</u> % | | |
| | Mounting Torque: <u>20 nom</u> in-lbs | | |
| NOTES: | | | |
| 1) Calibration is performed in compliance with ISO 10012-1, ANSI/NCSL Z540.3-2006 and ISO 17025 and is traceable to National Institute of Standards and Technology (NIST) and Physikalish-Technische Bundesanstalt (PTB). Proficiency to perform primary calibration validated through interlaboratory comparison to NIST (Project number 683/287323) and PTB (Project number 17014 and 17004). | | | |
| 2) $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ | | | |
| 3) Expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k=2$, which for a normal distribution corresponds to coverage probability of 95%. | | | |
| 4) This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc. | | | |
| 5) Calibrated on system PRIMARY STATION 1. | | | |
| 6) Calibration average of <u>4</u> positions. (4 positions = 2 laser+2 mount; 2 positions = 2 laser) | | | |
| 7) A2LA scope of accreditation applies to calibration performed in the frequency range from 5 Hz to 20 kHz only. | | | |
| COMMENTS | | | |
| 1) Calibrated with customer supplied cable. | | | |
| 2) Customer equipment ID # E9963-0253 | | | |
| Report No. 4-27-2020 92245 AM | | PAGE 1 of 3 | |
| | |   | |
| | | CALIBRATION CERT # 1862 01 | |
| | |  | |
| | | <small>3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 USA TEL: 716-684-0001 FAX: 716-684-0987 WWW.PCB.COM</small> | |

CALIBRATION CERTIFICATE

Model **2270M8**
 SN **16199**
 Date **4/27/2020**

Primary Calibration
 By Laser Interferometer
 I/O Demodulator Method AT-401-22

Transverse Sensitivity: **1.3** %
 Capacitance: **1649** pF

| Frequency (Hz) | Amplitude (g rms) | Sensitivity | | Sensitivity Expanded Uncertainty (%) | Deviation re 100 Hz (%) |
|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|---|-------------------------------|
| | | pC/g | [pC/m/s ²] | | |
| 20 | 1 | 2.004 | [0.2044] | 0.5 | 0.1 |
| 30 | 1 | 2.006 | [0.2045] | 0.5 | 0.1 |
| 40 | 1 | 2.005 | [0.2045] | 0.5 | 0.1 |
| 50 | 1 | 2.004 | [0.2044] | 0.5 | 0.1 |
| 60 | 1 | 2.003 | [0.2043] | 0.5 | 0.0 |
| 70 | 1 | 2.003 | [0.2043] | 0.5 | 0.0 |
| 80 | 1 | 2.003 | [0.2043] | 0.5 | 0.0 |
| 90 | 1 | 2.003 | [0.2042] | 0.5 | 0.0 |
| 100 | 5 | 2.003 | [0.2042] | 0.2 | 0.0 |
| 160 | 5 | 2.002 | [0.2041] | 0.2 | -0.1 |
| 200 | 5 | 2.001 | [0.2041] | 0.5 | -0.1 |
| 300 | 10 | 2.001 | [0.2040] | 0.5 | -0.1 |
| 400 | 10 | 2.003 | [0.2042] | 0.5 | 0.0 |
| 500 | 10 | 2.003 | [0.2043] | 0.5 | 0.0 |
| 600 | 10 | 2.004 | [0.2044] | 0.5 | 0.1 |
| 700 | 10 | 2.004 | [0.2044] | 0.5 | 0.1 |
| 800 | 10 | 2.002 | [0.2041] | 0.5 | 0.0 |
| 900 | 10 | 2.003 | [0.2042] | 0.5 | 0.0 |
| 1000 | 10 | 2.004 | [0.2044] | 0.5 | 0.1 |
| 2000 | 10 | 2.006 | [0.2045] | 1 | 0.2 |
| 3000 | 10 | 2.009 | [0.2049] | 1 | 0.3 |
| 4000 | 10 | 2.016 | [0.2055] | 1 | 0.6 |
| 5000 | 10 | 2.021 | [0.2061] | 1 | 0.9 |
| 6000 | 10 | 2.031 | [0.2071] | 1.5 | 1.4 |
| 7000 | 10 | 2.042 | [0.2082] | 1.5 | 2.0 |
| 8000 | 10 | 2.052 | [0.2092] | 1.5 | 2.4 |
| 9000 | 10 | 2.064 | [0.2104] | 1.5 | 3.0 |
| 10000 | 10 | 2.090 | [0.2131] | 1.5 | 4.3 |



CALIBRATION CERT # 1862 01

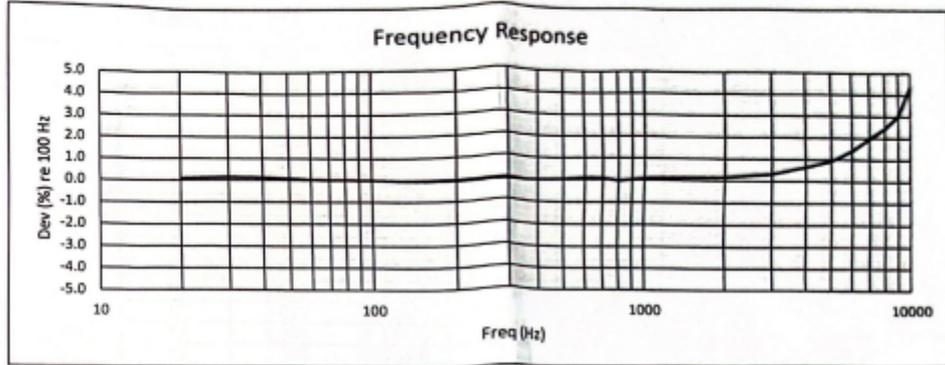
PCB PIEZOTRONICS
 MTS SYSTEMS CORPORATION

3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 USA
 TEL: 716-684-0001 FAX: 716-684-0987 WWW.PCB.COM

CALIBRATION CERTIFICATE

Primary Calibration
By Laser Interferometer
 I/O Demodulator Method AT-401-22

Model 2270M8
SN 16199
Date 04/27/20



EQUIPMENT LIST FOR PRIMARY STATION #1

Standards and/or equipment used during calibration
 Ref. ANSI/NCSL Z540, ISO 10012-1 and former MIL-STD-45662A

| Manufacturer | Description | Model | Control # | Cal Date | Due date | Used in this cal? Y/N |
|----------------------|-----------------------|----------|-----------|------------|------------|-----------------------|
| National Instruments | Data acquisition card | PCI 4462 | CA 1707 | 5/8/2019 | 5/8/2020 | Y |
| National Instruments | Data acquisition card | PCI 6110 | ME 287 | 5/8/2019 | 5/8/2020 | Y |
| Keysight | Signal generator | 33500B | CA 2616 | 10/18/2019 | 10/16/2020 | Y |
| Polytec | HeNe Interferometer | OFV 056 | 6 03 2375 | note [1] | note [1] | Y |
| APS Electro Seis | Long stroke shaker | 6 Inch | CA 386 | n/a | n/a | N |
| Bouche Labs | Air bearing shaker | 1000AD | SN 274 | n/a | n/a | N |
| PCB Piezotronics | Air bearing shaker | 396C11 | SN 112 | n/a | n/a | Y |
| General Radio | Reference capacitor | 1403-A | QC525 | 10/18/2019 | 10/16/2020 | Y |

[1] Displacement traceable through wavelength of HeNe laser accepted by International Standard ISO 15063-11 to be 632.81 nanometer.



CALIBRATION CERT # 1862 01

PCB PIEZOTRONICS
 MTS SYSTEMS CORPORATION

3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 USA
 TEL: 716-684-0001 FAX: 716-684-0987 WWW.PCB.COM