

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

**EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço 24 / 08 / 04

Ass.: 

# **CALIBRAÇÃO DE ACELERÔMETROS**

**JOSÉ CLAUDIO PINTO DE AZEVEDO**

**Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Mario Francisco Mucheroni**



**São Carlos**  
**2003**

DEDALUS - Acervo - EESC




31100047339

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **JOSÉ CLAUDIO PINTO DE AZEVEDO**


Dissertação defendida e julgada em 24-10-2003 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **MARIO FRANCISCO MUCHERONI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)


aprovado


  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **BENEDITO DI GIACOMO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **ROBERTO HIDEAKI TSUNAKI**  
(Universidade de Mogi das Cruzes/UMC)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

  
\_\_\_\_\_  
Profª. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

## Agradecimentos

Meu agradecimento especial ao Prof. Dr. Mario Francisco Mucheroni pela orientação, discussão e apoio fornecido durante a elaboração deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Ao Prof. Dr. Benedito Di Giacomo e Prof. Dr. Eduardo Morgado Belo pelos comentários e discussões no desenvolvimento do trabalho e também por cederem as dependências do laboratório de Metrologia e Ladinc.

Aos colegas de pós-graduação Alessandro, Vagner, Fabrício, Rosenda, Alexandre Caporali, Rosana, Rita, Alexandre, Márcia, Andréia, Alessandra, Prof. Dr. Flavio Marques, Carlos De Marqui, Edson, Naga, Elizangela, Dani, Luciane, Gisele, Carlinhos, Osnan, Otávio, Julio, Ana Paula, Andréia ladinc, Celso, Marcio, Gasparini, Adão Bolzan, Botelho, Risardi e tantos outros que estão fora desta lista.

Aos amigos em especial, onde tudo começou: Xina, Cristina Din, Suzete e Sudano

Ao Prof. Dr. Roberto Hideaki Tsunaki (Papi) pela amizade, paciência, sugestões e discussões que me ajudaram na elaboração do trabalho e também pelo desenvolvimento dos programas computacionais aqui utilizados.

Às secretárias da pós-graduação Ana Paula e Beth e todos os funcionários que permitiram a conclusão deste trabalho.

À Rosana Alvarez Paschoalino e todas as bibliotecárias que diretamente ou por *apud* me ajudaram neste trabalho.

Ao técnico Luiz Carlos Neves pelo esforço e dedicação no auxílio do projeto, sendo um coadjuvante importante no desenvolvimento e

construção de todos os dispositivos utilizados para elaboração deste trabalho.

Quero agradecer a um amigo que sempre me deu apoio e estímulo, auxiliando na elaboração e finalização deste trabalho: Alessandro Marques.

Agradeço as pessoas que sempre acreditaram e incentivaram a minha pessoa e que de uma forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho se concretizasse.

---

---

*Agradeço a meus pais por estar aqui,  
À Lillian e Bruno pela ajuda direta nesta conquista,  
À ELE por tudo.*

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1

1- Introdução.....	1
1.1- Objetivos.....	2
1.2- Justificativa.....	3
1.3- Plano de trabalho.....	4

## CAPÍTULO 2

2- Métodos de calibração e acelerômetros.....	6
2.1- Acelerômetros.....	7
2.2- Trabalhos e pesquisas correlacionados.....	12

## CAPÍTULO 3

3- Acelerômetros e sistemas de calibração.....	17
3.1- Acelerômetros.....	18
3.2- Funcionamento de um acelerômetro.....	19
3.3- Características de um acelerômetro.....	19

3.3.1- Sensibilidade.....	19
3.3.2- Peso e tamanho dos acelerômetros.....	20
3.3.3- Faixa dinâmica dos acelerômetros.....	20
3.4- Faixa de frequência do acelerômetro.....	21
3.4.1- Limite inferior.....	22
3.4.2- Limite superior.....	22
3.5- Fase das medidas e transientes.....	24
3.6- Sistemas de calibração.....	24
3.6.1- Métodos de calibração.....	30
Método absoluto.....	31
Método da comparação.....	31
3.6.2- Métodos de excitação.....	32
3.6.2.1- Método da frequência senoidal fixa	32
3.6.2.2- Método de varredura de frequência senoidal.....	33
3.6.2.3- Método da função de transferência com excitação aleatória.....	34
3.6.3- Calibração pelo método da comparação.....	34
3.6.3.1- Calibração pelo método absoluto...	36

3.6.4- Rastreabilidade de calibrações e hierarquia de padrões.....	39
Padrões e métodos de calibração.....	41
Comparações interlaboratoriais.....	42

## CAPÍTULO 4

4- Sistemas para calibração de acelerômetros – proposta.	43
4.1- Introdução.....	43
4.2- Sistema de calibração proposto.....	45
4.3- Metodologia utilizada.....	46

## CAPÍTULO 5

5- Sistemas e dispositivos de calibração.....	48
5.1- Método de calibração absoluto.....	49
Calibração por interferometria laser.....	49
Calibração por reciprocidade.....	50
Calibração utilizando a gravidade terrestre.....	50
5.2- Método da comparação.....	50
5.3- utilização dos métodos.....	51



5.4- Projeto e desenvolvimento do dispositivo.....	51
--	----

## CAPÍTULO 6

6- Resultados e discussões.....	61
6.1- Testes experimentais, resultados e discussões.....	61

---

## CAPÍTULO 7

7- Conclusões.....	74
Trabalhos futuros.....	75
Referências bibliográficas.....	77
Anexo: especificações técnicas dos equipamentos.....	80

# RESUMO

Azevedo, José Claudio Pinto de Azevedo (2003) Calibração de acelerômetros. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

---

Este trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de dois sistemas de calibração de acelerômetros. O primeiro sistema foi desenvolvido a partir de um sistema interferométrico laser Hewlett-Packard (HP 5529A), utilizado como padrão de referência absoluta. Este sistema foi projetado com o propósito de calibrar acelerômetros-padrão de comparação e acelerômetros-padrão de transferência. O segundo sistema de calibração utiliza como padrão de referência acelerômetros-padrão de comparação. Este segundo sistema foi projetado com o objetivo de calibrar acelerômetros de uso corriqueiro. Desta forma, o conjunto formado pelos dois sistemas de calibração podem ser rastreáveis até os padrões primários, nacionais e internacionais. Para cada um dos sistemas de calibração são apresentadas discussões relativas às suas características construtivas, aos testes de operação e às avaliações sobre os desempenhos alcançados.

Palavras-chave: calibração; rastreabilidade; interferometria laser.

## **ABSTRACT**

Azevedo, José Claudio Pinto de (2003) Calibration of accelerometers. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

---

This work presents the design and development of two accelerometer calibration systems. The first system was developed from a Hewlett-Packard laser interferometric system (HP 5529A), taken as an absolute reference standard. This system was designed to allow calibration of comparison standard accelerometers and transfer standard accelerometers. The second calibration system, which employs comparison standard accelerometers as reference, was designed to calibrate common use accelerometers. Thus, the arrangement of the two calibration systems can be traceable until the primary national and international standards. For each calibration system, a discussion is presented, concerning their constructive characteristics, operation testing and evaluation of accomplished performance.

Keywords: Calibration, traceability and laser interferometric system.

---

# **CAPÍTULO 1**

## **1- INTRODUÇÃO**

Com a crescente demanda de produtos de alta tecnologia ocorrida no mercado mundial após a segunda metade do século 20, requisitos como o conforto, a segurança, a viabilidade econômica, vêm sendo muito exigidos. Um dos grandes problemas que o projetista enfrenta na área de dinâmica é a pesquisa e análise das diferentes fontes de vibração e de ruído que ocorrem naturalmente ou então são provocados por um outro meio qualquer. Este tipo de estudo é utilizado para prevenir futuros acidentes ou mal funcionamento em máquinas e estruturas mecânicas, identificando a fonte de ruído e como solucionar o referido problema.

Para que se possa identificar e analisar as diferentes fontes de ruídos existentes, vários tipos de dispositivos, equipamentos e sensores foram projetados. Um dos sensores mais utilizados para este tipo de trabalho são os acelerômetros, objetos de estudo neste trabalho.

---

## **1.1- OBJETIVOS**

A finalidade principal deste trabalho é estudar e desenvolver um sistema com o objetivo de fazer a aferição (calibração) dos acelerômetros, independente de seu tamanho e peso. Este sistema de calibração será desenvolvido em conjunto com suportes mecânicos especialmente projetados para a montagem dos acelerômetros ou outros equipamentos necessários para aquisição dos sinais a serem estudados. Neste último caso, um dos equipamentos utilizado é um sistema de interferometria “laser” utilizado em metrologia dimensional. Um outro método usa outro acelerômetro denominado de padrão de referência, utilizado para a calibração de outros acelerômetros.

O acelerômetro é o tipo de sensor mais comumente utilizado devido às suas características técnicas e à sua versatilidade para instalação. Os acelerômetros já saem calibrados de fábrica com todas as informações necessárias para sua utilização contidas na sua carta de calibração, que será apresentada nos capítulos a seguir.

Para que as medidas realizadas com acelerômetros sejam sempre confiáveis, os mesmos têm que ser aferidos periodicamente, afim de que se possa saber se suas características não estão modificadas devido a

algum distúrbio qualquer provocado naturalmente, ou pelo usuário durante sua utilização. Quedas bruscas, excesso de temperatura ou mesmo utilização inadequada são causas freqüentes de variação das características desses sensores.

Após a obtenção dos sinais por qualquer um dos sistemas que for escolhido, estes serão analisados e comparados por métodos apropriados. Faz-se a comparação dos sinais captados no acelerômetro a ser aferido com um acelerômetro padrão ou com os sinais obtidos no sistema laser, o que corresponde a dois procedimentos: método da comparação (“*back-to-back*”), isto é, um acelerômetro contra o outro e método absoluto (interferometria “laser”), acelerômetro contra o refletor do sistema “laser”. Em ambos os casos todos estão no mesmo eixo de vibração. Todos estes dados serão analisados por programas computacionais especialmente desenvolvidos para este propósito. Quando se utiliza a interferometria “laser” para aquisição de sinais e comparação de resultados, diz-se que o sistema de calibração é primário e, quando for utilizado um acelerômetro padrão para fazer a comparação, diz-se que o sistema de calibração é secundário.

## **1.2- JUSTIFICATIVA**

Para a realização deste trabalho dois fatores relevantes foram estudados e levados em consideração:

1. Para efetuar análises estruturais a quantidade de acelerômetros a serem utilizados é bem grande, o que acarretaria um

alto custo para que estes fossem enviados a laboratórios especializados para se fazer suas aferições, além da demora para retorno, acarretando deste modo em se fazer aquisição de outros para substituírem os dispositivos que forem para aferição.

2. Os equipamentos necessários para se fazer a análise e comparação dos resultados são de fácil aquisição e se encontram a disposição no Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos.

### **1.3- PLANO DE TRABALHO**

Este trabalho tem como objetivo principal projetar e analisar sistemas de calibração de acelerômetros, assim como dispositivos especiais para que se possa fazer esta calibração sem a necessidade de enviá-los a institutos e laboratórios de calibração. Para tanto, esta dissertação está desenvolvida em sete capítulos, descritos a seguir:

O capítulo 1 faz uma apresentação do tema a ser estudado, definindo deste modo os objetivos e justificativas do trabalho.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho, através de publicações referentes ao assunto. Neste capítulo são feitas as definições de sistemas de calibração de acelerômetros.

No capítulo 3 são feitas a descrição técnica e de funcionamento de um acelerômetro, assim como a apresentação de um sistema de calibração para estes sensores.

O capítulo 4 trata da proposta de trabalho referente ao tema apresentado, definindo o tipo de sistema de calibração a ser utilizado, o

suporte para fixação e o método a ser aplicado na comparação dos resultados.

No capítulo 5 são descritos os procedimentos do trabalho a ser efetuado e a teoria necessária para se determinar os dados obtidos com os dois sistemas utilizados, além da descrição de seus funcionamentos. Também é apresentado o programa computacional utilizado para analisar estes dados.

---

No capítulo 6 são descritos os testes experimentais, bem como os resultados finais obtidos e uma discussão sobre os mesmos.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre os resultados, processos de obtenção dos resultados e funcionalidade do dispositivo. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros neste tema.



## **CAPÍTULO 2**

### **MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E ACELERÔMETROS**

O grande avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos, que provocou o desenvolvimento de novas tecnologias e novos produtos, obrigou o projetista em engenharia a ter uma preocupação constante para descobrir, isolar ou evitar as fontes de ruídos que estes novos produtos geram e que são indesejáveis.

Com o intuito de auxiliar a solução desses problemas foram desenvolvidos dispositivos especiais para medir os níveis de vibrações das fontes de ruídos. Entre eles estão aqueles denominados transdutores ou acelerômetros. Para que essas medidas sejam sempre confiáveis, com erros pequenos, e assim não deteriorar os resultados finais do trabalho, estes acelerômetros tem que ser calibrados periodicamente.

Com base nesse problema e nas dificuldades e custos em se realizar tal calibração, surge a necessidade do desenvolvimento de um sistema de calibração para acelerômetros baseado em instrumentos próprios do Laboratório de Metrologia e também do desenvolvimento de dispositivos para tal fim.

## **2.1 – Acelerômetros**

Desde o início da era moderna, pós revolução industrial, uma das grandes preocupações do engenheiro projetista está relacionada aos ruídos, vibrações mecânicas e aos efeitos indesejáveis que estes possam causar. Estudos de suas fontes geradoras e uma solução para minimizá-los ou mesmo eliminá-los, são tarefas constantes na engenharia atual.

Estudos de vibrações mecânicas requerem o uso de transdutores para medir deslocamento, velocidade ou aceleração. Entre estes, os chamados acelerômetros, tem importância fundamental nos testes estruturais e nas análises modais.

Acelerômetros são transdutores que produzem um sinal elétrico proporcional à aceleração aplicada (Rust, 1997). Grande parte dos acelerômetros em uso hoje em dia utilizam o efeito piezoelétrico do cristal de quartzo ou de cerâmicas especiais para gerar um sinal elétrico

proporcional à aceleração. Outros tipos de acelerômetros utilizam *strain gages* (piezoresistivos) ou tecnologia de capacitância variável.

Os primeiros dispositivos desenvolvidos para serem utilizados na medição das vibrações que se desejavam analisar foram construídos utilizando *strain gages* (extensômetros), como por exemplo na Figura 2.1. Estes elementos são resistores que variam seu valor de acordo com uma deformação mecânica nele aplicada.

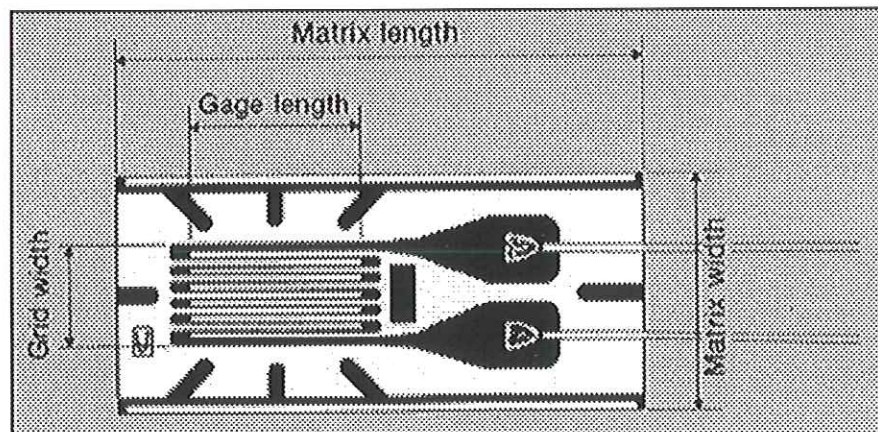


Figura 2.1 Esquema de um *strain gage* (extensômetro).

A aplicação de extensômetros em testes estruturais é documentada por Selegim (Selegim, 1990) e também em trabalhos com calibradores de acelerômetros (Nisbet, 1959), onde foi discutido seu uso. O esquema básico de um calibrador de *strain gages* e acelerômetros está mostrado na Figura 2.2. Dois *strain gages* foram montados diametralmente opostos em um circuito em meia ponte cujo fornecimento de tensão **DC** é monitorada por um voltímetro. A barra é excitada no primeiro ou terceiro modo de ressonância por um oscilador

de áudio e um amplificador de potência. A saída da ponte é amplificada e a medida é feita fotografando o sinal na tela do osciloscópio, ou lendo uma pequena faixa num voltímetro a vácuo e um osciloscópio conectado para medir a deflexão da amplitude do sinal de saída.

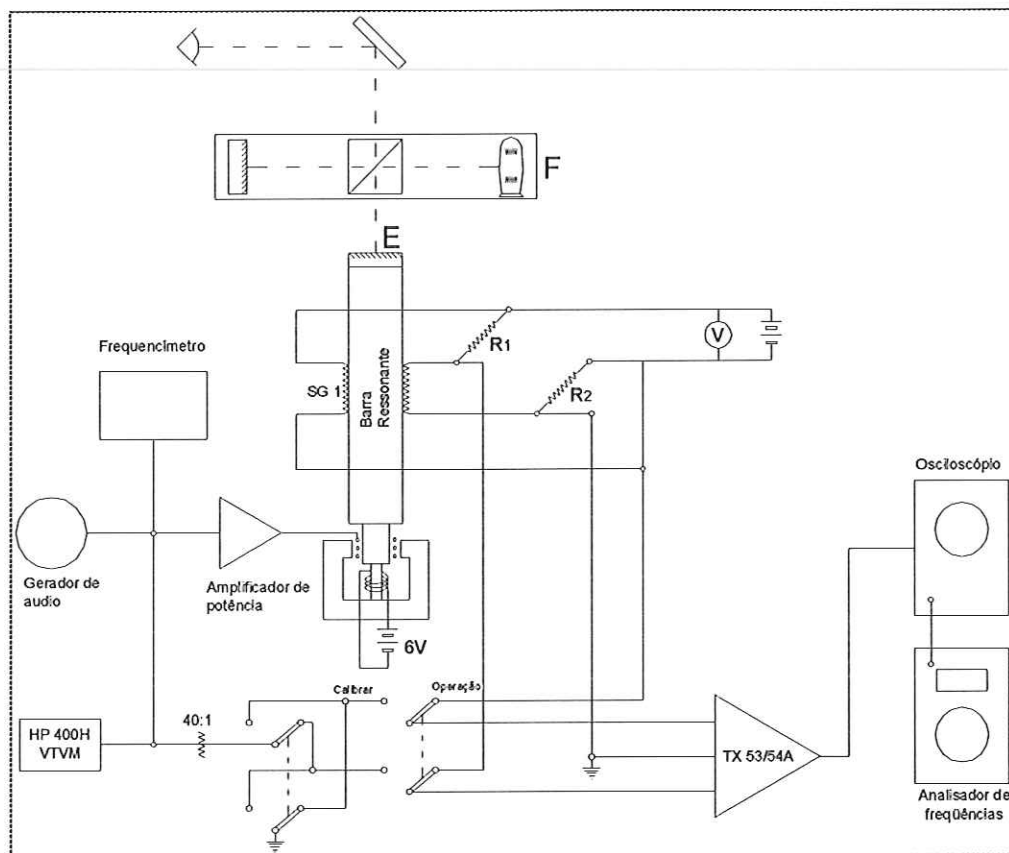


Figura 2.2 – Calibrador de acelerômetros e *strain gages*.

Uma vez que um jogo de extensômetros foi calibrado, a barra tornar-se-á um padrão secundário para a calibração de acelerômetros de alta frequência. Esta barra passa a ser um sistema de alto Q (fator de qualidade), e necessita apenas de uma pequena corrente para seu

funcionamento, minimizando deste modo o ruído e produzindo altos níveis de aceleração (2000 a 4000 g com frequência entre 2,1Hz a 10,1 kHz).

Nos últimos 30 anos, uma nova tecnologia utilizada para a medição de vibrações mecânicas foi desenvolvida, permitindo assim realizar medidas mais complexas com maior rapidez e com um padrão de confiabilidade dentro das normas internacionais.

Em princípio, impacto e movimentos de vibrações mecânicas são medidos em referência a um ponto fixado no espaço por dois tipos de transdutores:

1. Transdutor de Referência Fixa:- um dispositivo do transdutor é colado ao ponto que é fixo no espaço (interferômetro) e o outro dispositivo é colado ao ponto que está se movendo para fazer a medida (retrorefletor). Um exemplo típico de Transdutor de Referência Fixa é o sistema laser interferométrico.
2. Transdutor Massa-mola (transdutor sísmico):- a base é o ponto de referência do sistema massa-mola, esta é colada ao ponto onde se vai medir o impacto ou a vibração sofrida ou gerada. O movimento do ponto é obtido a partir do movimento relativo da massa. Transdutores piezoelétricos sensíveis são comumente usados nestes tipos de acelerômetros e células de cargas. Aqui somente serão exploradas as características destes transdutores e em especial as características dos acelerômetros.

O acelerômetro é o transdutor de medida de vibração mais freqüentemente utilizado devido à sua pequena dimensão, alta sensibilidade e faixa larga de frequência de uso. Utilizando acelerômetros piezoelétricos a fim de converter o movimento vibratório em sinais elétricos, o processo de medição e análise é facilmente

realizado graças à versatilidade de aparelhos eletrônicos. Outros transdutores, como os de velocidade e deslocamento tem certas deficiências que o acelerômetro não possui, como, por exemplo, tamanho, peso e faixa de frequência de uso. Há vários tipos freqüentemente utilizados: os que usam como elemento sensível *strain gages*, ou seja, os piezoresistivos, aqueles que usam cristais piezoelétricos, e os capacitivos. Destes dois tipos de sensores, o transdutor com cristal piezoelétrico é o mais utilizado, pelo motivo de ser um transdutor leve, com alta sensibilidade e obtenção mais fácil das freqüências naturais, particularmente devido ao fato de que o acelerômetro vibra e amortece ao mesmo tempo. Os modelos destes dispositivos estão em constante aprimoramento, devido a técnicas de micro-usinagem que permitem que sejam produzidos a cada dia com dimensões menores e precisão maior.

A Figura 2.3 mostra três tipos de acelerômetros, que são chamados de compressão isolada (A), compressão com terminação (B) e cisalhamento (C). Cada tipo de transdutor tem uma base, um cristal piezoelétrico e uma massa sísmica. Esta massa sísmica é o elemento sensor do transdutor, pois quando é submetida a uma aceleração, provoca uma compressão ou um cisalhamento no cristal. Estas deformações, por sua vez, gerarão pequenas tensões elétricas que serão captadas e analisadas por equipamentos especialmente desenvolvidos para este propósito. Estes três elementos (base, cristal piezoelétrico e massa sísmica) são contidos dentro de uma caixa protetora. O cristal piezoelétrico e a caixa estrutural (em alguns casos) se combinam para dar uma taxa elástica efetiva para apoiar a massa sísmica  $m$ . O projeto de acelerômetros de cisalhamento reduz a sensibilidade do transdutor quanto a flexões na base do mesmo, o que ocorre quando o acelerômetro é fixado em posições das estruturas com altas flexões. É comum ter um

suporte com rosca na base do transdutor e um cabo coaxial especial para conectar o transdutor à sua interface eletrônica.

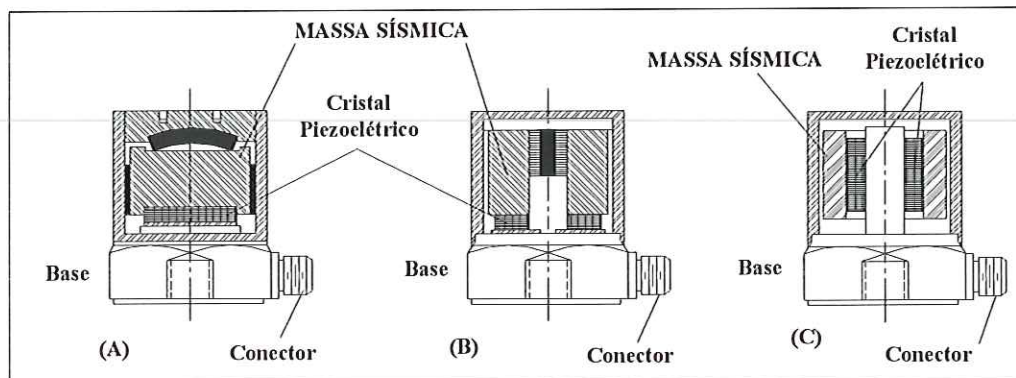


Figura 2.3- Tipos de acelerômetros

## 2.2 – Trabalhos e pesquisas correlacionados

O trabalho que aqui será apresentado está inserido dentro da teoria de calibração de acelerômetros e de vibrações mecânicas. Foram realizados vários estudos a fim de se determinar o melhor projeto de um dispositivo adequado ao método escolhido e o tipo de equipamento a ser utilizado no presente trabalho. Será discutido o procedimento para a comparação a ser efetuada entre os resultados obtidos pelo sinal do acelerômetro a ser calibrado com o sinal do sistema de calibração. Dependendo do sistema e do método a ser utilizado na análise dos resultados em conjunto com a montagem dos equipamentos para

captação dos sinais do acelerômetro, o sistema poderá ser classificado como calibrador primário ou como calibrador secundário.

Para todas as medidas que envolvam a qualidade de um produto ou serviço, a rastreabilidade de padrões internacionais é exigida (ISO, 1993). Quando se utiliza um acelerômetro de referência para calibrar um outro acelerômetro, o primeiro tem que ser devidamente calibrado em um laboratório de calibração apropriado, de modo que seus resultados quando comparados com os de outro acelerômetro sejam aceitáveis dentro de parâmetros pré-estabelecidos.

Os sistemas de calibração são ditos primários quando utilizam um método absoluto para estabelecer a sensibilidade do transdutor a ser calibrado, derivando as unidades obtidas em quantidades físicas dentro do Sistema Internacional de Unidades. Uma aplicação mais usual e precisa para este método é a utilização de um sistema de interferometria a laser (Serridge, 1987). Este tipo de sistema de calibração está esquematizado na Figura 2.4, mostrando todos os equipamentos e acessórios necessários para sua utilização. Quando um transdutor é calibrado desta maneira ele é denominado de Transdutor Padrão Primário de Referência e poderá ser utilizado para calibrar outros transdutores.

Os sistemas de calibração são chamados de secundários quando os transdutores neles analisados são calibrados por outros transdutores de referência devidamente calibrados em um instituto ou laboratório de calibração. O desenho esquemático deste tipo de sistema de calibração é mostrado na Figura 2.5.



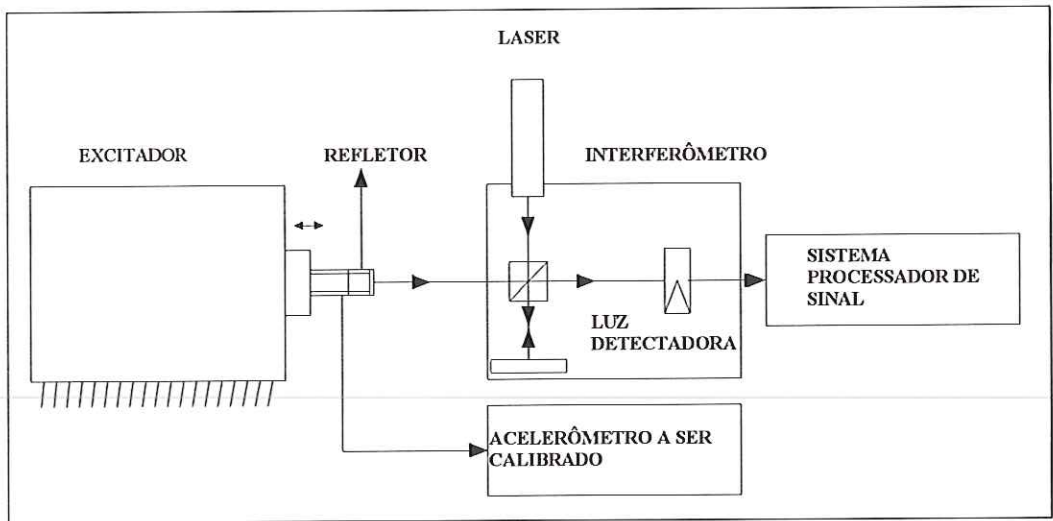


Figura 2.4- Sistema de Calibração primário de acelerômetros

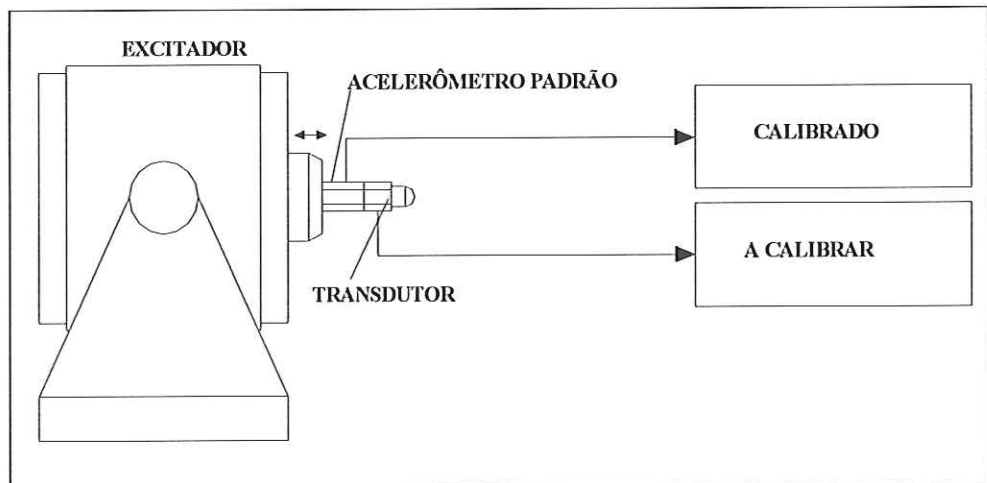


Figura 2.5- Sistema de Calibração secundário de acelerômetros

Os sistemas de calibração secundários geralmente utilizam a montagem *back-to-back* para o acelerômetro a ser calibrado, ou seja: este acelerômetro e o acelerômetro de referência padrão são localizados ao longo de um mesmo eixo, fixados um ao outro, ou então acoplados através de um dispositivo projetado para esse fim.

Um outro método de calibração que também utiliza interferometria laser para medida de amplitude e fase de uma vibração é o que consiste na geração de sinais de quadratura (Link, 1998). Estes sinais são gerados utilizando processos digitais com o intuito de prevenir erros que ocorrem quando os sinais de quadratura são gerados por meios óticos.

Um sistema de calibração de acelerômetros com baixo  $g$  por atração de massa também foi desenvolvido (Reinel, 1971). Neste tipo de sistema de calibração usa-se uma aceleração na entrada para calibrar um acelerômetro. O limite superior de aceleração é de  $10^{-9} \text{ m/s}^2$  em órbita e  $10^{-7} \text{ m/s}^2$  em laboratório ( $g$  é aceleração da Terra e vale  $9,81 \text{ m/s}^2$ ). A aceleração foi feita no laboratório por um acelerômetro eletrostático pendurado em um eixo único (MESA) com uma massa de atração variável.

Brennan (Brennan, 1957) também utilizou *strain gages* na construção de um sistema de calibração de acelerômetros utilizando o método. Este método é válido sobre uma grande faixa de frequências. Calibrações de acelerômetros realizadas por este método são de fácil utilização e os defeitos dos acelerômetros como resposta insuficiente de frequência, constante de tempo inadequada e saturação dos pulsos, são facilmente detectados.

Outra técnica que foi utilizada para a calibração de acelerômetros ou qualquer outro dispositivo utilizado para medir vibrações consiste em prender o acelerômetro em uma barra livre-livre e excitá-la eletromagneticamente com um deslocamento senoidal conhecido (Tizzer, 1950). O deslocamento da amplitude da barra foi medido com *strain gauges* calibrados por um método ótico e este comparado com o sinal de saída do acelerômetro a ser calibrado.

Com a finalidade de desenvolver sistemas de calibração cada vez mais preciso, uma nova abordagem foi apresentada por Sutton, 1990. Foi desenvolvido um sistema capaz de medir frequências de 1 mHz até 25 KHz com amplitudes variando de 1 nm até 10 m. Para a realização deste experimento foi utilizado um laser interferométrico heterodinâmico para medir a posição do acelerômetro que está vibrando em função do ângulo de fase. Fazendo uma integração coerente visando melhorar o comprimento da resolução e a imunidade a ruídos, obtém-se uma descrição mais completa da vibração por meio de análise de Fourier.

---

## **CAPÍTULO 3**

# **ACELERÔMETROS E SISTEMAS DE CALIBRAÇÃO**

No campo da Metrologia é difícil motivar gerentes industriais quanto aos custos e às vantagens de uma calibração, conhecendo-os da sua importância para a manutenção de máquinas (Veldman, 1996). A calibração de equipamentos e máquinas é uma ferramenta essencial para a manutenção preventiva.

Quando se ouve a palavra vibração, imediatamente pensa-se em algo vibrando ou alguém trabalhando com equipamentos que vibrem (uma britadeira, por exemplo). Equipamentos para medir vibrações são utilizados principalmente como instrumentos de diagnóstico, podendo medir vibrações em aplicações médicas, vibrações de equipamentos, etc. Estas medidas são utilizadas principalmente em análises dinâmicas de comportamento de estruturas mecânicas e no campo de controle de vibrações.

Um dos sensores mais utilizados em medições de vibrações é o acelerômetro. A seguir será feita uma explanação sobre os acelerômetros, métodos de calibração e os sistemas de calibração, equipamentos utilizados para fazer a aferição dos acelerômetros.

### **3.1 – Acelerômetros**

Acelerômetros são transdutores que produzem um sinal elétrico proporcional à aceleração nele aplicada. A grande maioria em uso hoje em dia utiliza o efeito piezoelétrico do cristal de quartzo ou cerâmicas especiais, para gerar um sinal elétrico em sua saída proporcional à aceleração a que esta sendo submetido. Outros tipos de acelerômetros utilizam *strain gauges* (piezoresistivo) ou tecnologia de capacitância variável.

### **3.2 - Funcionamento de um acelerômetro**

O acelerômetro piezoelétrico é um autogerador, de modo que não necessita de uma fonte de energia externa. Não possui peças móveis, que se desgastam. Sua saída é proporcional à aceleração e pode ser integrada de modo a fornecer sinais proporcionais à velocidade e ao deslocamento. A essência de um acelerômetro piezoelétrico está em uma pastilha de material piezoelétrico, geralmente um pedaço de cerâmica artificialmente polarizado, que apresenta o efeito piezoelétrico típico. Quando submetido à pressão mecânica, quer por tração, compressão ou cisalhamento, gera uma carga elétrica nas faces, a qual é proporcional à força aplicada. Este sinal de carga é coletado num eletrodo e condicionado, amplificado e medido em equipamentos especialmente desenvolvidos para este fim.

### **3.3 – Características de um acelerômetro**

As características de um acelerômetro devem ser bem conhecidas, pois terão que ser observadas quando se desejar fazer a escolha de um modelo correto para se efetuar uma determinada medida de vibração.

### **3.3.1 - Sensibilidade**

A sensibilidade é normalmente a primeira característica levada em consideração. O ideal seria ter um elevado nível de saída, mas é preciso fazer concessões, porque a alta sensibilidade normalmente significa um conjunto piezoelétrico relativamente grande e, por isso mesmo, um transdutor também relativamente grande e pesado. Em condições normais, a sensibilidade não constitui problema muito grave, pois os pré-amplificadores são atualmente projetados para aceitar os sinais de baixo nível.

### **3.3.2 – Peso e tamanho dos acelerômetros**

A massa, ou tamanho dos acelerômetros torna-se importante quando se faz medidas em objetos leves. Se a massa for muito grande pode alterar de forma significativa os níveis de vibração e a frequência do sistema a ser examinado. Como regra geral, o tamanho do acelerômetro não deve nunca exceder 1/10 da massa dinâmica da peça a ser medida, sobre a qual é colocado.

### **3.3.3 – Faixa dinâmica dos acelerômetros**

Quando se deseja medir níveis de vibrações excepcionalmente baixos ou altos, a faixa dinâmica dos acelerômetros deve ser levada em

conta. O limite inferior mostrado na Figura 3.1 não é normalmente determinado diretamente pelo acelerômetro, e sim pelo ruído elétrico proveniente de cabos de ligação e circuito de amplificação. Este limite normalmente é da ordem de  $0,01 \text{ m/s}^2$  em instrumentos de uso geral. O limite superior é determinado pela força estrutural do acelerômetro. Um acelerômetro típico de uso geral é o do tipo linear de  $50.000$  a  $100.000 \text{ m/s}^2$ , ou seja, operam na faixa mais comum de vibração das estruturas mecânicas. Um acelerômetro especialmente projetado para medir choques mecânicos terá uma faixa linear que vai até  $1000 \text{ km/s}^2$  ( $100000 \text{ g}$ ).

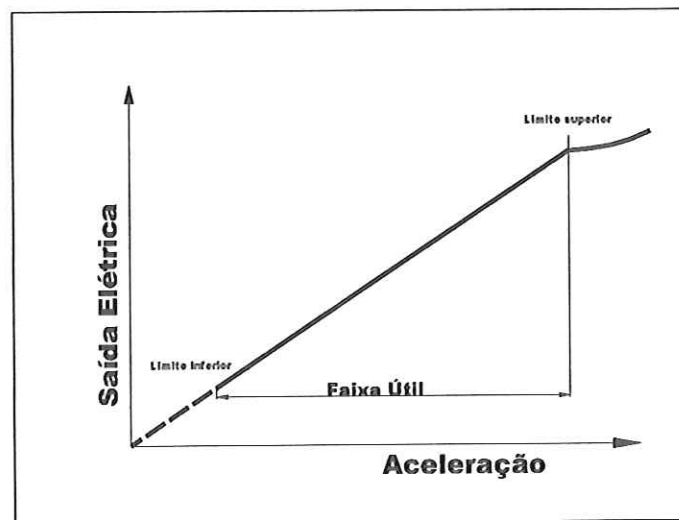


Figura 3.1 – Níveis de aceleração de um acelerômetro

### 3.4 – Faixa de frequência do acelerômetro



Os sistemas mecânicos costumam ter a maior parte de sua energia vibratória contida numa faixa de frequência relativamente estreita que vai até 1000 Hz. As medições são feitas algumas vezes até um nível de aproximadamente 10 kHz, quando houver componentes de vibrações que devem ser analisados nestas altas frequências. Por conseguinte, deve-se ter a certeza, ao escolher um acelerômetro, de que a faixa de frequência do aparelho realmente abrange a faixa de interesse.

#### **3.4.1 – Limite inferior**

Na prática, a faixa de frequência na qual o acelerômetro fornece a saída real é limitada no lado de baixa frequência por dois fatores descritos a seguir:

O primeiro fator é o limite inferior de corte de frequência do amplificador que o segue. Normalmente, isto não constitui problema porque este limite é geralmente bem inferior a 1 Hz.

O outro fator é o efeito das variações de temperatura ambiente às quais o acelerômetro é sensível. Com os modernos acelerômetros do tipo de cisalhamento, este efeito é reduzido ao mínimo, permitindo medições até abaixo de 1 Hz em ambientes normais.

#### **3.4.2 – Limite superior**

O limite superior é determinado pela frequência de ressonância do sistema de massa-mola do próprio acelerômetro.

Pode-se adotar o limite superior da faixa de frequência em 1/3 da frequência de ressonância do acelerômetro, tendo certeza que os componentes de vibração medidos até este limite estarão numa faixa de erro inferior a 12%. No caso de acelerômetros pequenos, em que a massa é reduzida, a frequência de ressonância pode ser até 180 kHz. Já para os aparelhos um pouco maiores, de saída mais alta e de uso geral, frequências de ressonância entre 20 a 30 kHz são comuns.

### **3.5 – Fase das medidas e transientes**

A variação de fase de um acelerômetro corresponde ao tempo de atraso entre a entrada mecânica e a resultante elétrica na saída. Se o tempo de atraso não é constante para todas as frequências na faixa de operação, a relação entre as várias componentes de um sinal de vibração pode ser alterada, resultando em uma saída elétrica que é distorcida em relação à entrada mecânica.

Para frequências localizadas abaixo da ressonância, a variação de fase introduzida é insignificante. Para frequências muito próximas da ressonância, o atraso do movimento da massa sísmica com a base do transdutor introduz uma distorção de fase. Alguns fabricantes de acelerômetros garantem uma faixa de frequência estreita em cima da ressonância, podendo então este ser utilizado além da sua faixa de frequência útil sem introduzir distorção de fase. Porém, tem que ser

considerado a linearidade de fase de carga ou voltagem dos pré-amplificadores utilizados, especialmente se uma seqüência de integração ou filtros estão em uso.

Isto é importante quando são medidas vibrações transientes e choques mecânicos, pois uma atenção especial deve ser tomada para a linearidade global do sistema, senão os transientes reproduzidos podem ser distorcidos. Acelerômetros piezoelétricos são transdutores extremamente lineares e podem reproduzir uma larga faixa de transientes sem problemas. O acelerômetro é uma fonte pequena de erro pelo menos quando são feitas medidas de transientes.

### **3.6 – Sistemas de Calibração**

É necessário fazer periodicamente a calibração dos acelerômetros para que seja verificada sua resposta em freqüência e também sua sensibilidade, para garantir sua integridade e detectar possíveis danos.

Todo acelerômetro vem calibrado de fábrica, acompanhado pelo relatório de calibração, ou seja, da carta de calibração, como mostrado na Figura 3.2. Nesta figura está apresentado o modelo de carta de calibração padrão utilizado pela B&K para seus acelerômetros quando saem de fábrica. Quando os acelerômetros são guardados e utilizados dentro de seus limites, ou seja, quando não são submetidos a choques excessivos, a grandes variações de temperaturas, as suas características permanecerão praticamente imutáveis durante um longo período de

tempo. Os ensaios têm demonstrado que a alteração das características é inferior a 2%, mesmo após vários anos de uso.

Todavia, durante o uso normal, os acelerômetros são algumas vezes submetidos a um tratamento bastante violento, que geralmente podem resultar em uma mudança sensível de suas características, ou até mesmo em avaria permanente. Se acidentalmente cair da mão de uma pessoa sobre uma superfície de concreto, o acelerômetro poderá sofrer um choque de milhares de  $g$ , causando deste modo degradações nas medidas efetuadas. É aconselhável neste caso, proceder a uma calibração periódica nos acelerômetros, com o objetivo de verificar a sua sensibilidade e a faixa de resposta em frequência. Isto geralmente é suficiente para confirmar se ocorreram ou não danos irreparáveis devido ao uso ou a algum acidente durante o seu manuseio.

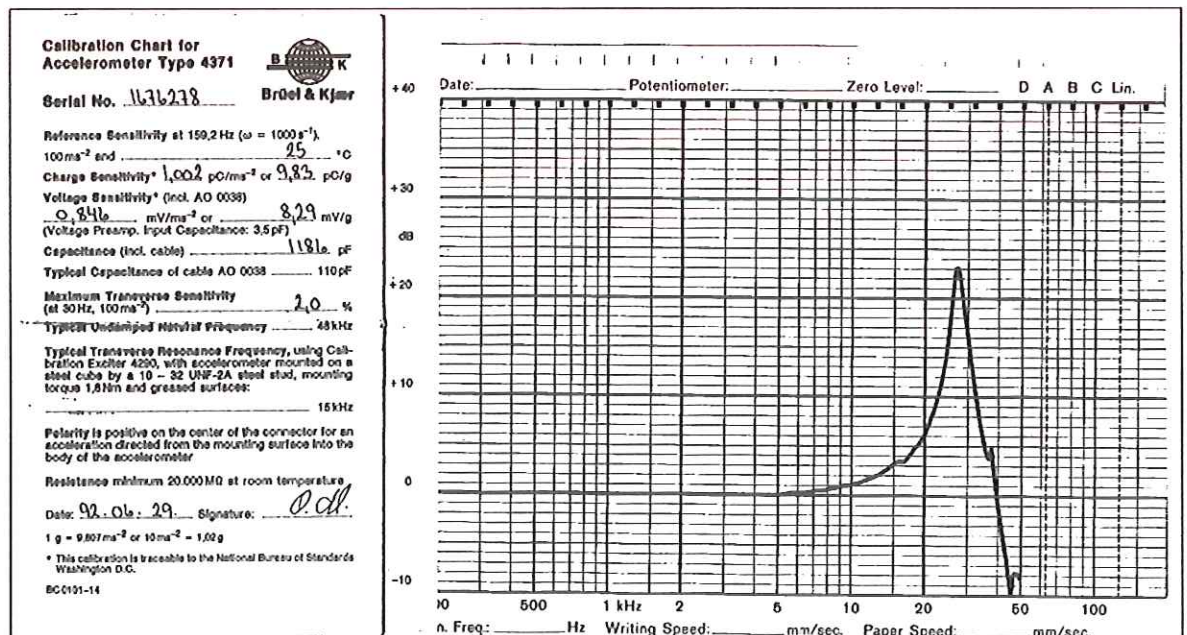


Figura 3.2- Carta de calibração de um acelerômetro B&K

Geralmente, na maioria dos acelerômetros, sua carta de calibração é feita a uma frequência de 159,2 Hz, pois nesta frequência as amplitudes da aceleração, velocidade e deslocamento são as mesmas como será mostrado a seguir.

Uma das características de acelerômetros piezoelétricos é a sua capacidade de medir, com precisão, vibração em uma faixa de amplitudes extremamente grande, ou seja, possui uma faixa dinâmica larga. Desta forma, a quantificação dos níveis de vibração bem como a sua análise em gráficos com escalas de amplitudes lineares podem dificultar a sua correta interpretação.

Assim, é comum a utilização de escalas de amplitudes em decibel (dB). A escala em decibel é definida como a razão de uma amplitude em relação a uma outra e é expressa em uma forma logarítmica. Para amplitudes de vibração é utilizada as seguintes expressões:

$$N(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{A^2}{A_{ref}^2} \right)$$

ou

$$N(dB) = 20 \log_{10} \frac{A}{A_{ref}}$$

onde:

N=número de decibéis.

A=amplitude de vibração medida.

$A_{ref}$ =amplitude de referência.

Os valores das amplitudes de referência ( $A_{ref}$ ) são normatizados pela ISO 1683 conforme o tipo de sinal medido:

Aceleração----- $A_{ref}=10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>.

Velocidade----- $A_{ref}=10^{-9}$  m/s.

Deslocamento----- $A_{ref}=10^{-12}$  m.

Uma observação deve ser feita quando da utilização dos valores das amplitudes de referência dadas pela norma ISO 1683:

Para uma onda senoidal com frequência  $\omega=1000$  radianos por segundo ( $\cong 159,2$  Hz), os valores de referência quando convertidos para decibéis são numericamente idênticos. Da mesma forma ocorre para um dado valor de amplitude de um sinal em aceleração, quando este sinal é convertido para velocidade, o valor numérico da amplitude em dB na frequência de 100 rad/s são idênticos aos da aceleração.

Esta é uma das razões para a utilização da frequência de 100 rad/s na definição da sensibilidade para alguns acelerômetros. Esta afirmação também pode ser visualizada no gráfico da Figura 3.3.

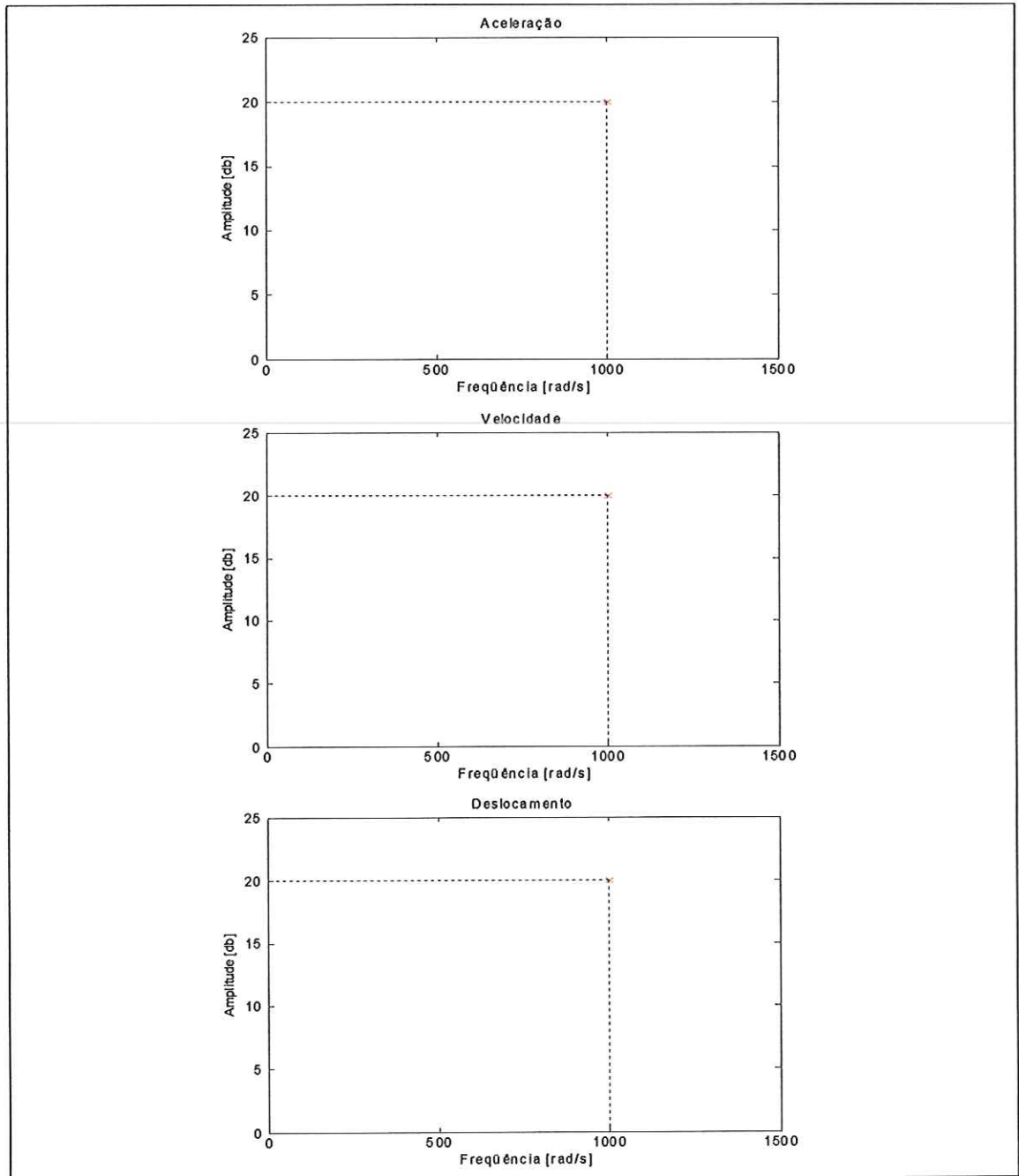


Figura 3.3- Amplitudes de saída na freqüência de 159,2 Hz.

O modo mais fácil realizar uma verificação e uma calibração periódica de acelerômetros é utilizar sempre um procedimento

calibração antes e depois de cada uso dos equipamentos. Deste modo poderá se saber se o problema não está sendo gerado por um emprego errôneo do acelerômetro em questão.

Os tipos de sistemas de calibração mais frequentemente encontrados no mercado são os que utilizam um acelerômetro padrão de referência, previamente calibrado em um laboratório ou instituto de calibração. Nestes locais são utilizados um sistema de calibração de acelerômetro denominado de Sistema de Calibração Primário, conforme apresentado no capítulo anterior. Neste tipo de Sistema de Calibração (denominado de Secundário), usam-se as tensões de saída dos dois acelerômetros. Como a sensibilidade do acelerômetro padrão de referência é conhecida, será relativamente fácil descobrir a sensibilidade do outro acelerômetro, com um grau de precisão dentro de normas regulamentadas para este fim.

Quando este tipo de Sistema de Calibração for utilizado, consegue-se fazer a calibração dos acelerômetros determinando sua sensibilidade e faixa de frequência de operação. O seu esquema, a forma de utilização e a montagem estão mostrados na Figura 3.4.

A aplicação prática deste Sistema de Calibração é muito útil, pois faz uma análise rápida e eficiente do acelerômetro a ser verificado. Desta forma não são necessários laboratórios especializados para esta calibração. Consegue-se medir o nível de saída do acelerômetro fazendo a leitura no medidor localizado no painel frontal do calibrador, comparando esta medida com um nível pré-definido.



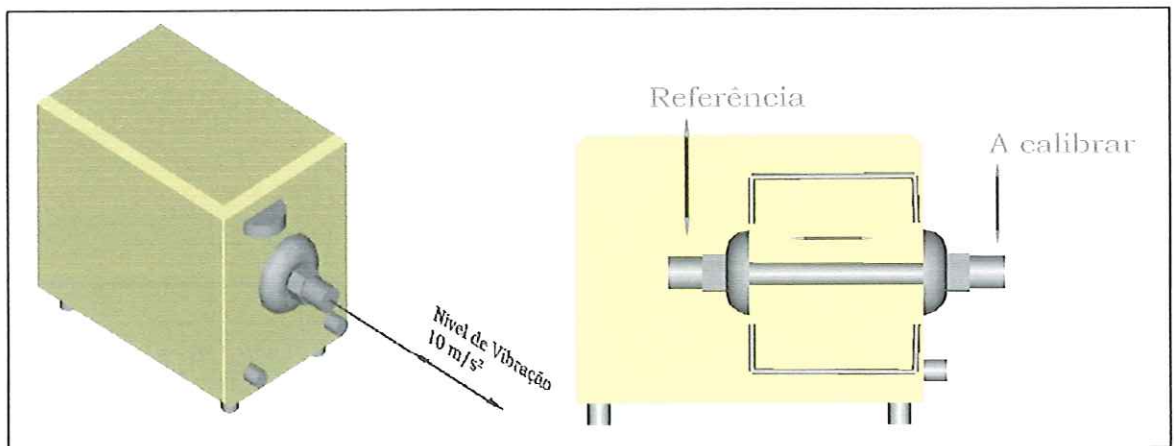


Figura 3.4 – Montagem, sentido e nível de vibração

### 3.6.1 – Métodos de calibração

Para que as medidas efetuadas por acelerômetros sejam confiáveis, estes têm que serem calibrados periodicamente. O objetivo deste trabalho está relacionado com o desenvolvimento de um sistema para a calibração de acelerômetros, utilizando para isto os equipamentos existentes em laboratórios de metrologia e também o desenvolvimento de dispositivos para esta finalidade.

A sensibilidade de um acelerômetro (saída elétrica/entrada mecânica), pode ser obtida através de métodos de calibração absolutos ou comparativos (Dias et al., 1999). Nos métodos absolutos, a sensibilidade é obtida diretamente pela medição de grandezas que formam a base do sistema de unidades. São métodos geralmente

restritos a institutos metrológicos primários nacionais e fabricantes utilizados para a calibração de acelerômetros padrão e de referência.

Os métodos de calibração utilizados neste trabalho estão descritos a seguir:

#### **Método Absoluto:**

Os Métodos Absolutos mais utilizados são:

1. Calibração por Interferometria Laser: teoricamente a amplitude de vibração pode ser determinada com uma precisão de 0.02%, mas vários erros podem interferir na medida, como: tensões elétricas, distorções do excitador de vibração, inclinação e movimento transversal do acelerômetro.
2. Calibração por Reciprocidade: é um método aplicado a transdutores que satisfaçam certos critérios (reversibilidade, linearidade, etc.). Esta calibração só é feita em uma faixa de frequência conhecida
3. Calibração utilizando a aceleração da gravidade terrestre gravidade terrestre – neste método o acelerômetro é girado em um círculo vertical de modo que somente a aceleração da gravidade atue nele. Este método só é prático para baixas frequências.

#### **Método da Comparação:**

Este método consiste em se realizar a comparação de dados de dois acelerômetros, sendo um o acelerômetro padrão de referência e o outro o acelerômetro a ser analisado (a calibrar). Neste caso usa-se este método com uma montagem do tipo *back-to-back*.

### **3.6.2 – Métodos de excitação**

Depois que se define o método de calibração a ser utilizado para a calibração do acelerômetro, define-se o tipo de excitação a ser utilizado. Neste trabalho os seguintes tipos foram testados:

#### **3.6.2.1 – Método da frequência senoidal fixa**

Um simples e conveniente meio de executar uma calibração por comparação é usar uma frequência fixa no excitador de vibração com valor desejado e ajustar a amplitude de vibração do mesmo para um valor conveniente. O transdutor em teste e o de referência padrão são colocados para trabalhar com movimentos idênticos. Suas saídas elétricas são processadas através de amplificadores (ambos amplificadores de carga ou voltagem) e então elas serão comparadas. O amplificador do canal de teste pode ter um ganho variável para poder ser calibrado. Um atenuador é então usado no canal de referência (assumindo que sua voltagem de saída é maior que a do canal de teste).

Um voltímetro simples pode ser empregado para comparar a voltagem de saída dos dois canais, sendo que as duas medidas serão efetuadas alternadas pelo mesmo instrumento.

### 3.6.2.2 – Método de varredura de frequência senoidal

Um diagrama gráfico da sensibilidade do transdutor em teste ou sua divergência com relação à sensibilidade de referência/frequência pode ser um rápido e conveniente método de calibração (Serbyn, 1996). A Figura 3.5 mostra um circuito simples com boa resolução e com um sistema de comparação estável onde pode ser obtido o diagrama de sensibilidade do transdutor. A configuração deste sistema é similar ao do método da frequência senoidal fixa, porém, um amplificador diferencial é usado para medir a diferença de voltagem entre os dois canais. As duas voltagens “ac” geradas são iguais por alguma referência condicional no ajuste de ganho do amplificador. O registrador de ganho é ajustado para uma determinada diferença, igual à porcentagem do fator de calibração do acelerômetro em teste.

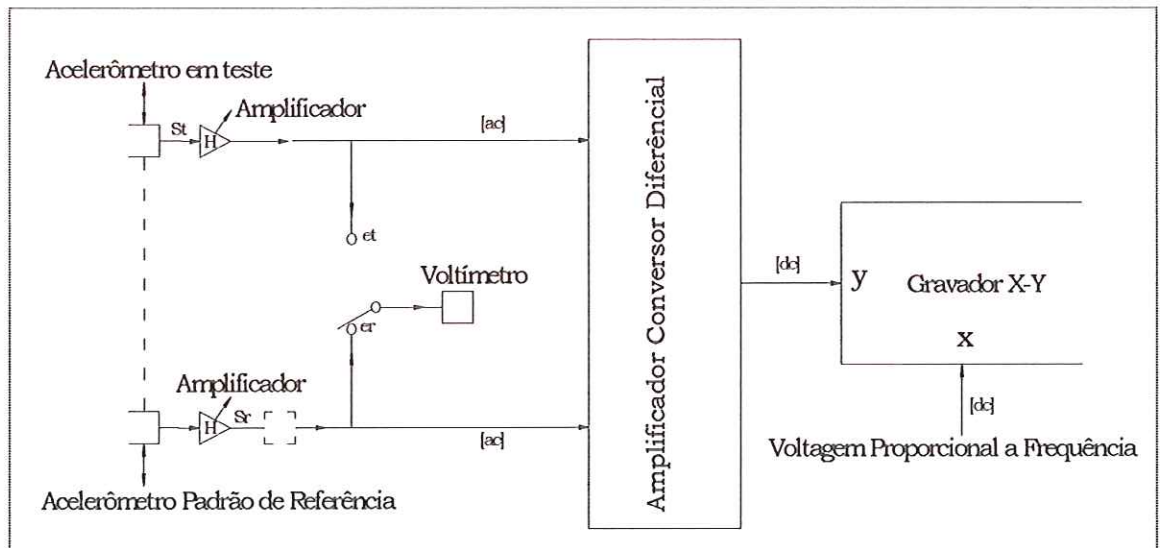


Figura 3.5 – Diagrama para medição da tensão de saída dos acelerômetros

### **3.6.2.3 – Método da função de transferência com excitação aleatória**

O uso de excitação com vibração aleatória e técnicas de análises de função de transferência pode mostrar rapidamente e de forma precisa um método de comparação. O transdutor de referência padrão e o de teste são montados tipo *back-to-back* sobre o excitador. Suas saídas são ligadas a um analisador de espectro por meio de um par de filtros passa-baixa (antialiasing). A largura da banda do sinal aleatório do excitador é determinada por ajustes no analisador.

Este método de excitação fornece uma calibração quase contínua em cima de um espectro de frequências, com o resultado da função sensibilidade tendo as informações de amplitude e de fase. Um movimento senoidal simples e puro não é requerido como nos outros métodos de calibração, diminuindo com isso o uso de amplificadores de potência e excitadores a fim de manter um baixo valor de distorção harmônica. Uma medida muito usual da qualidade do processo é o cálculo da função de coerência entrada/saída.

### **3.6.3 – Calibração pelo método da comparação**

Um método eficiente para medir a sensibilidade de vibração de um transdutor é a comparação direta com um segundo transdutor (usado como padrão de referência). Este transdutor também tem que ser calibrado por um dos métodos descritos neste trabalho.

O método da comparação é muito utilizado em laboratórios de choque e vibração, que envia periodicamente seus padrões para um

laboratório padrão primário para calibração. Neste método de calibração os dois transdutores são usualmente montados em tipo *back-to-back* no excitador, como mostrado na Figura 3.6.

A calibração pelo método da comparação é limitada pela faixa de freqüências e amplitudes, porque o transdutor padrão de referência tem que ser previamente calibrado. Se ambos os transdutores são lineares, a sensibilidade do transdutor em teste pode ser calculada a partir de:

$$S_t = \frac{e_t}{e_r} S_r$$

onde:

$S_t$ —sensibilidade do sensor em teste

$S_r$ —sensibilidade do sensor de referência

$e_t$ —voltagem de saída do transdutor em teste

$e_r$ —voltagem de saída do transdutor de referência

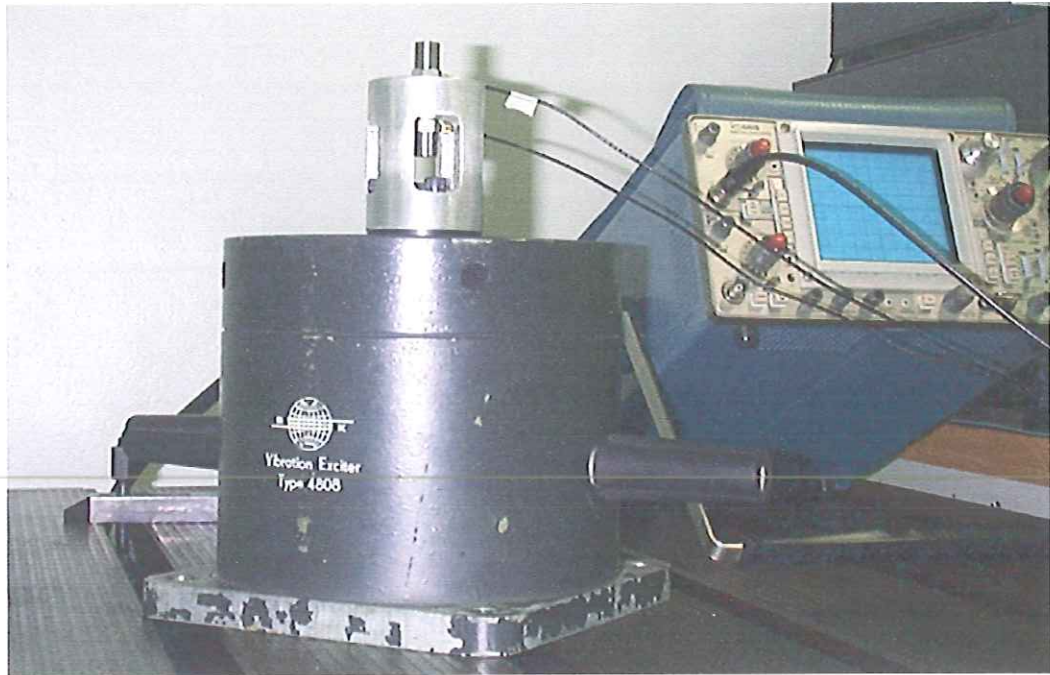


Figura 3.6- Calibração com montagem *back-to-back*

### **3.6.3.1- Calibração pelo método absoluto**

Este método inclui o uso de interferometria laser e técnicas de reciprocidade. Neste tipo de calibração são utilizados equipamentos mais precisos. Quando um laboratório possui um interferômetro laser usado em metrologia para medidas de deslocamento, pode-se através de programas computacionais especiais e dispositivos desenvolvidos para tal propósito fazer a calibração dos acelerômetros por um método absoluto, neste caso, interferometria laser. A faixa de frequências a ser analisada será limitada (neste caso) em um valor próximo a 1,2 kHz devido a diferença entre os intervalos de frequência do sistema laser

com o sistema B&K. A montagem deste sistema de calibração está mostrada na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Calibração utilizando interferometria laser

Com todas as informações e dados obtidos pelo sistema de calibração escolhido, pode-se definir sensibilidade de um transdutor piezoelétrico, ou seja, a razão entre a saída elétrica e a entrada mecânica. A sensibilidade de todos os transdutores é função da frequência, contendo informações de amplitude e fase, como mostrado na Figura 3.8. Portanto é uma quantidade que pode ser representada na forma complexa (Roman, 1996).



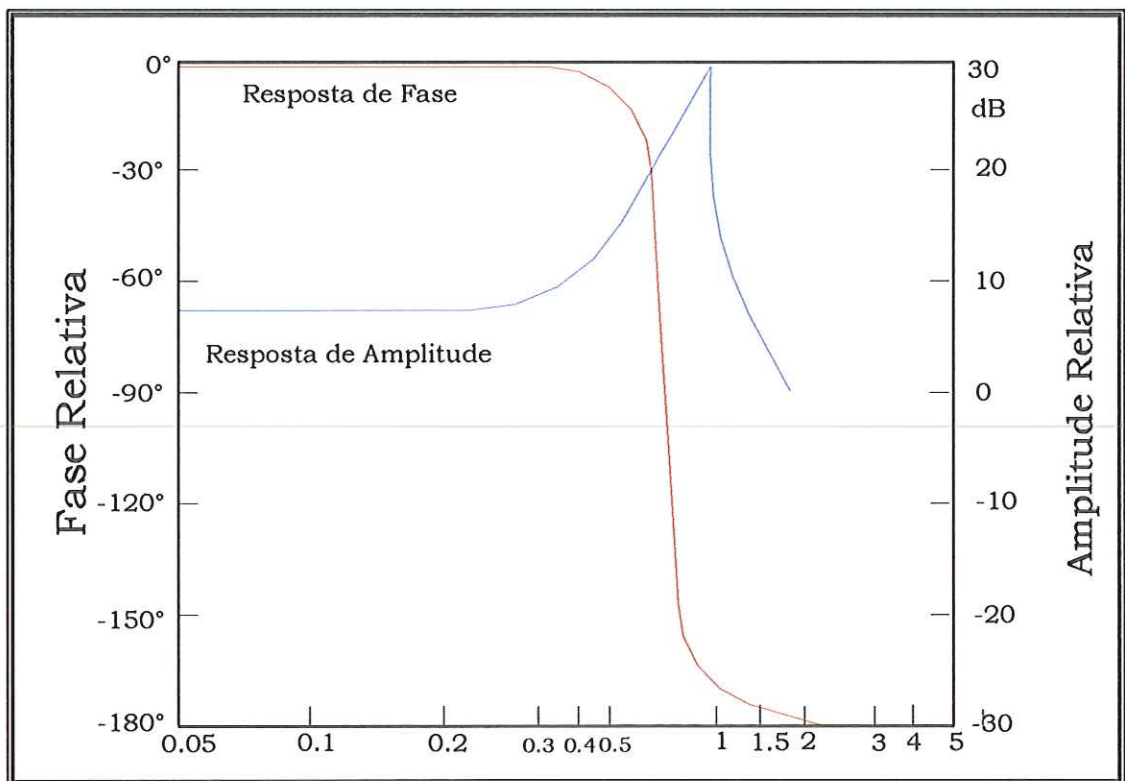


Figura 3.8 – Resposta de amplitude e fase em frequência

Se a sensibilidade é praticamente independente da frequência dentro de uma faixa limitada, o valor de sua magnitude é chamado de “fator de calibração” para essa faixa. É especificado numa determinada frequência. A correspondente fase da função sensibilidade também possui um valor praticamente constante dentro da faixa de frequências, geralmente igual a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ . Entretanto também pode também ser proporcional à frequência, sem provocar distorções na medida.

A resposta em frequência de um transdutor é mostrada plotando as componentes de magnitude e fase da sua sensibilidade em função da frequência. Esta informação é usualmente apresentada através do valor

da sensibilidade numa frequência de referência, dentro da faixa de aplicação do transdutor. A frequência utilizada internacionalmente para este tipo de análise é 160 Hz (159,2 Hz) que corresponde a 1000 rad/s; a grande maioria dos acelerômetros são calibrados nesta frequência.

Deslocamentos são usualmente expressos em valores de amplitude (pico) ou dobro da amplitude (pico a pico), enquanto a velocidade é expressa em valor de pico, valor rms ou valor médio. Aceleração ou força são geralmente expressas por valores de pico ou rms. A saída elétrica de um transdutor de vibração pode ser expressa por pico, rms ou valores médios. A magnitude da sensibilidade ou fator de calibração é comumente expresso como quociente de valores semelhantes, isto é, com o numerador e o denominador em valores de pico ou em valores rms.

#### **3.6.4 – Rastreabilidade de calibrações e hierarquia de padrões**

A padronização das medidas de vibração exige que o padrão de trabalho de todos os laboratórios sejam rastreados através de um Laboratório Padrão Nacional em cada país. O termo rastreabilidade implica conseqüentemente numa consistência em que os trabalhos executados em um laboratório de calibração sejam conhecidos, desde a precisão, até os métodos de calibração a serem executados. Existe um Laboratório Padrão Nacional, localizado nos USA, que trabalha com massa, acústica e grupos de vibrações, que é o Instituto Nacional de Normas e Tecnologia –NIST, localizado na cidade de Gaithersburg.

Os transdutores padrões são ordenados dentro de três grupos:

1. Padrão primário (o mais preciso),

2. Padrão de transferência e
3. Padrão de referência de trabalho (Litch, 1981).

O topo desta hierarquia é constituído pelos padrões primários. Estes são calibrados por um método absoluto. Um padrão de transferência pode ser calibrado por qualquer método absoluto ou de comparação e intercambiado entre os laboratórios com o propósito de comparação ou calibração dos padrões de referência de trabalho. Os transdutores padrão de referência de trabalho são usados para a calibração de comparação dos transdutores de uso comum. Eles também podem ser calibrados por um método absoluto para a manutenção da rastreabilidade.

Abaixo está descrito o funcionamento, os tipos de equipamentos, os padrões e os métodos de calibração, comparação e rastreabilidade de um Laboratório de calibração.

Vinculado à Divisão de Metrologia Acústica e de Vibrações, o Laboratório de Vibrações (Lavib) é o laboratório de referência dos Laboratórios Metrológicos do Inmetro responsável, portanto, pela guarda, manutenção e realização das unidades do Système International d'Unités (SI) das grandezas aceleração, velocidade e deslocamento no país. No desempenho de sua missão institucional, o Lavibé também responsável pela disseminação dessas unidades para os laboratórios credenciados que integram a Rede Brasileira de Calibração (RBC), assegurando-lhes rastreabilidade internacional. Neste sentido, o Lavib atua como estratégico instrumento de descentralização e fortalecimento da infra-estrutura de serviços básicos para a qualidade e competitividade, em atendimento à demanda dos laboratórios credenciados de calibração e de ensaios e laboratórios de Metrologia Legal supervisionados pelo Inmetro.

Dispondo de infra-estrutura laboratorial adequada, com 150 m<sup>2</sup>, e beneficiando-se dos serviços de outros laboratórios e áreas de apoio dos Laboratórios Metrológicos do Inmetro, as instalações do Lavib atendem a exigências de normas internacionais. Intensificando a sua atuação na metrologia científica, o Lavib tem como objetivo a sua participação nos fóruns científicos nacionais e internacionais, participando de programas de comparação interlaboratorial. Para atingir estes objetivos, o Laboratório está envolvido num intensivo programa de capacitação de pessoal, implantação de serviços e realização de pesquisas.

### **Padrões e Métodos de Calibração**

O Lavib dispõe de padrões rastreados às referências metrológicas de Laboratórios Nacionais de outros países, notadamente do National Institute of Standards & Technology (Nist/EUA) e do Physikalisch-Technisch-Bundesanstalt (PTB/Alemanha). Os principais padrões metrológicos sob a responsabilidade do Lavib são:

Conjunto de acelerômetro 8305 e amplificador 2650 Brüel & Kjaer, 10 Hz a 10 kHz, Incerteza:  $\pm 0,2$  %.

Conjunto de acelerômetro 8002K e amplificador 5020 Kistler, 10 Hz a 10 kHz, Incerteza:  $\pm 0,2$  %.

Servo acelerômetro QA3000 Allied Signal, dc a 200 Hz, incerteza de  $\pm 0,5$  %.

Sistema de calibração comparativa conforme norma ISO 5347/3, 10 Hz a 10 kHz, Incerteza:  $\pm 1,0$  %.

Sistema de calibração absoluta por interferometria a laser conforme norma ISO 5347/1, 50 Hz a 1.000 Hz, Incerteza:  $\pm 0,5$  % para

frequência de referência (faixa de calibração em fase de extensão para: 1 Hz a 10 kHz).

Calibrador 4808 Wavetek, tensão AC, Incerteza: 50 ppm.

Capacitor 1404-B Quadtech, 100 pF, Incerteza de 5 ppm

---

### **Comparações Interlaboratoriais**

Participando sistematicamente de programas de comparação interlaboratorial em nível internacional, o Lavib assegura a confiabilidade global do processo de medição no País, que envolve a calibração de padrões, procedimentos de medição, orientação na adequação laboratorial e sistemática de operação laboratorial. Dentre as principais comparações laboratoriais conduzidas, destacam-se:

Calibração de acelerômetros por interferometria a laser, na faixa de 50 Hz a 3 kHz; coordenação do Nist/EUA (1995, Round-Robin).

Calibração de acelerômetros por interferometria a laser e calibração elétrica de amplificadores de carga, na faixa de 50 Hz a 5 kHz; coordenação do Nist/EUA (1997/1998).

Calibração de acelerômetros por método comparativo, norma ISO 5347/3; laboratórios e instituições prestadoras de serviços no País; coordenação do Inmetro (1998).

---

# **CAPÍTULO 4**

## **Sistemas para calibração de acelerômetros - proposta**

### **4.1 – Introdução**

O estudo das vibrações mecânicas tornou-se de fundamental importância para a engenharia moderna. Frequentemente deve-se fazer medidas das vibrações que ocorrem numa máquina ou numa estrutura

mecânica para que se realizar as manutenções preventivas ou mesmo preditivas. Uma parada imprevista de algum equipamento devido a algum dano provocado por essas vibrações, pode causar grandes prejuízos financeiros e ambientais, dependendo do tipo de equipamento ou máquina (Almeida, 1998).

Ao se fazer as medidas das vibrações mecânicas em máquinas ou estruturas devido a influências naturais ou ao modo como estas estruturas ou máquinas estão sendo utilizadas, independentemente de sua aplicação, tem que haver uma ótima confiabilidade nos instrumentos e dispositivos utilizados.

Para que isso tenha validade a rastreabilidade dos equipamentos e dispositivos utilizados também têm que ser efetuada. Neste caso, os acelerômetros são os dispositivos que devem ter sido calibrados. Assim, os dados que forem obtidos serão confiáveis. Por isso os acelerômetros devem ser calibrados periodicamente, afim de que sua faixa de frequências e sensibilidade sejam verificadas e comparadas com padrões estabelecidos por normas internacionais.

Este procedimento nem sempre é viável nas empresas ou instituições que fazem uso de acelerômetros como dispositivos para medição dos sinais de vibrações. Isto ocorre principalmente devido a dois fatores básicos:

**Tempo:** enviar os acelerômetros periodicamente a um instituto de calibração ou laboratório torna-se um processo demorado. Em alguns casos o número de acelerômetros para fazer a calibração, dependendo de seu emprego, é muito grande, da ordem de centenas.

**Custo financeiro:** para comprar um sistema completo de calibração de acelerômetros, ou possuir um grande número de acelerômetros de reserva para substituírem os que são enviados para calibração, além de acarretar um custo elevado (acelerômetros e sistema de calibração), terá um uso limitado a apenas uma operação (sistema de calibração), ou seja, calibrar acelerômetros.

## 4.2 Sistema de calibração proposto

Utilizando os conceitos de calibração de acelerômetros publicados por Serridge & Licht (1987), e os experimentos que foram realizados por Von Martens *et al* (2000), nota-se a complexidade em se fazer calibrações de acelerômetros devido a influências de diversos fatores, que serão analisados no decorrer do trabalho. Os tipos de sistemas de calibração de acelerômetros mais comumente utilizados são classificados como primário (sistema absoluto) e secundário (por comparação).

Nesses dois tipos de sistemas de calibração, utiliza-se primeiramente um acelerômetro padrão de referência calibrado em um laboratório ou instituto de calibração para verificar a validade do sistema escolhido e dispositivo desenvolvido.

Tomando como objetivo a redução do tempo de calibração e a diminuição do custo financeiro e, admitindo também, que a maioria das empresas que trabalham com sinais de vibração podem possuir um sistema laser interferométrico utilizado em metrologia dimensional, estudou-se também um sistema de calibração que utiliza interferometria laser. Desta maneira pode-se construir dois sistemas de calibração: um sistema primário (método absoluto), feito pelo sistema interferométrico laser e outro secundário (comparação), que utiliza um sistema que utiliza um acelerômetro padrão de referência.

Foram desenvolvidos dois sistemas de calibração com a finalidade de poder fazer a rastreabilidade do sistema secundário pelo sistema absoluto desenvolvido.

O sistema desenvolvido para a calibração do acelerômetro por comparação é composto de um dispositivo de alumínio em um único bloco que será acoplado a um excitador. Nele serão fixados o acelerômetro padrão de referência e o acelerômetro a ser calibrado. Por outro lado, no



sistema com laser como referência para a calibração, o espelho refletor substituirá o acelerômetro de referência padrão.

A montagem mecânica do sistema de calibração por comparação se baseia em acoplar um dispositivo para fixação dos acelerômetros a um excitador eletromecânico. Tanto o acelerômetro padrão de referência como o acelerômetro a ser calibrado, vibrarão com a mesma frequência e a mesma amplitude. Os acelerômetros e o excitador devem estar alinhados.

Os sinais captados pelos acelerômetros e amostrados no analisador de sinais, serão comparados entre si após serem devidamente preparados. Através de um programa computacional especialmente desenvolvido para este propósito será feita a análise do funcionamento do dispositivo. Neste caso o sistema é considerado como padrão secundário de referência. Se for feito a análise com o sistema interferométrico laser, substitui-se o acelerômetro em teste pelo espelho refletor. Neste caso é utilizado um sistema paralelo próprio para aquisição do sinal do laser. Se após estes testes, o dispositivo for aprovado através de um método pré-estabelecido, então poderá ser utilizado um sistema de calibração primário ou secundário, dependendo do tipo de montagem a ser feita.

### **4.3 Metodologia utilizada**

Para a análise dos sistemas propostos, tem que se escolher um método de calibração e excitação através do qual será feita a comparação dos dados obtidos. Dois métodos de calibração foram escolhidos: Absoluto, utilizando um sistema interferométrico laser; e Comparação. Os dados do sistema interferométrico laser são comparados com os dados obtidos pelo acelerômetro a ser calibrado. No método da comparação, com montagem dos acelerômetros do tipo *back-to-back* sobre o excitador, os dados de

ambos acelerômetros serão comparados. A escolha do método será feita após um estudo comparativo dos métodos descritos no capítulo anterior, observando a praticidade e a eficiência para a realização de cada experimento.

No método absoluto, o dispositivo projetado é montado com o espelho refletor e acelerômetro a ser calibrado e acoplado ao excitador de modo que não sofra influências de oscilações diferentes das que são originadas pelo movimento longitudinal do mesmo. O feixe do laser é dirigido ao centro do espelho refletor que se encontra no mesmo eixo geométrico do acelerômetro em estudo. Este feixe é refletido pelo espelho e retorna ao canhão laser com a mesma amplitude de deslocamento e a mesma frequência do acelerômetro. Esse sinal é analisado e comparado através de programas computacionais desenvolvidos para este fim, com o sinal do acelerômetro a ser calibrado.

No método da comparação, o dispositivo é montado igualmente e acoplado ao excitador. Os dois acelerômetros são fixados ao dispositivo com eixos geométricos coincidentes com o do excitador. Os sinais de ambos os acelerômetros são comparados através de programas computacionais próprios.

A validade dos sistemas propostos é discutida a partir das curvas de resposta em frequência. A faixa de frequência utilizada também é analisada e discutida em funções de limitações no sistema interferométrico laser.

---

# **CAPÍTULO 5**

## **Sistemas e dispositivos de calibração**

Acelerômetros piezoelétricos são os principais sensores utilizados em análises modais e monitoração de vibrações mecânicas. O seu uso na indústria é muito amplo podendo ser encontrado em análise de vibração em estruturas aeronáuticas, no monitoramento de vibrações de máquinas em linhas de produção, no monitoramento de vibrações de eixos de turbinas, etc.

Em muitos casos a sua utilização se dá em áreas críticas, e do seu correto funcionamento pode depender a segurança de pessoas e máquinas. Desta forma, a garantia de seu correto funcionamento e da validade da precisão dos resultados pode ser alcançada através de calibrações periódicas, quando se duvida de seus resultados ou quando este sofrer algum dano aparente.

A calibração dos acelerômetros estabelece uma ligação entre o sensor e padrões mantidos em laboratórios de padronização existentes em diversos países. Esta ligação é feita através de uma cadeia rastreável de calibrações até se chegar aos principais laboratórios, onde os padrões primários são mantidos. A eficiência da cadeia de rastreabilidade pressupõe a existência de diversos laboratórios de calibração distribuídos geograficamente. No Brasil, país de grande dimensão continental, e pleno desenvolvimento econômico, existem uma necessidade crescente de laboratórios de calibração credenciados, aptos a estabelecer o elo entre o usuário final do sensor e o INMETRO.

Para se efetuar esta calibração, dois métodos são utilizados na calibração de acelerômetros, discriminados a seguir.

### **5.1- Método de Calibração Absoluto.**

No Método de Calibração Absoluto, os resultados são expressos em termos das sete quantidades básicas do SI. Este método inclui os seguintes tipos de calibração:

***I - Calibração por interferometria laser*** - teoricamente a amplitude de vibração pode ser determinada com uma precisão de 0,02%, mas

vários erros podem interferir na medição, como tensões elétricas, distorções do excitador de vibrações, inclinação e movimento transversal do acelerômetro.

**II- Calibração por reciprocidade** - é um método absoluto que pode ser executado desde que se possua um equipamento básico. Usa-se transdutores lineares passivos (Goujon, 2002)

**III- Calibração utilizando a gravidade terrestre** - neste método o acelerômetro é girado em um círculo vertical de modo que somente a gravidade aja nele. Este método só é prático para baixas frequências.

Dentre estes três tipos de calibração, a mais utilizada é a calibração através de um sistema laser interferométrico, devido a sua precisão e também a facilidade de operação. Os calibradores que utilizam este método são conhecidos como calibradores primários.

## **5.2- Método da Comparação.**

Este é o método mais utilizado para a calibração de acelerômetros, devido ao seu baixo preço, mas não é o mais preciso. Para a realização deste método de calibração faz-se a comparação dos resultados de dois acelerômetros, um sendo o acelerômetro padrão de referência e o outro o acelerômetro a ser calibrado. Neste tipo de método utiliza-se a montagem *back-to-back* entre os acelerômetros.



### **5.3- Utilização dos métodos**

Neste capítulo será apresentada a descrição do dispositivo para fixação dos acelerômetros e do sistema de calibração a ser utilizado de acordo com o método de calibração escolhido. Serão desenvolvidos dois métodos de calibração através do método *back-to-back* e outro utilizando um sistema de interferometria laser.

A realização deste projeto se deu devido a diversos fatores, entre os quais podemos citar: dificuldade em enviar os acelerômetros para os devidos laboratórios de calibração, quantidade de acelerômetros a serem calibrados, facilidade e rapidez na calibração, etc. Outro fator que colabora no desenvolvimento do projeto, é que a maioria das empresas que atuam na área de metrologia tem à disposição equipamentos para medir vibrações mecânicas, e sistemas de interferometria laser para medir deslocamentos.

### **5.4 Projeto e desenvolvimento do dispositivo**

Neste item são apresentados o desenvolvimento de dispositivos para a fixação dos acelerômetros e espelho refletor do sistema laser para trabalhar em conjunto com um sistema de calibração definido.

A seguir será apresentado os desenhos dos dispositivos que foram projetados.

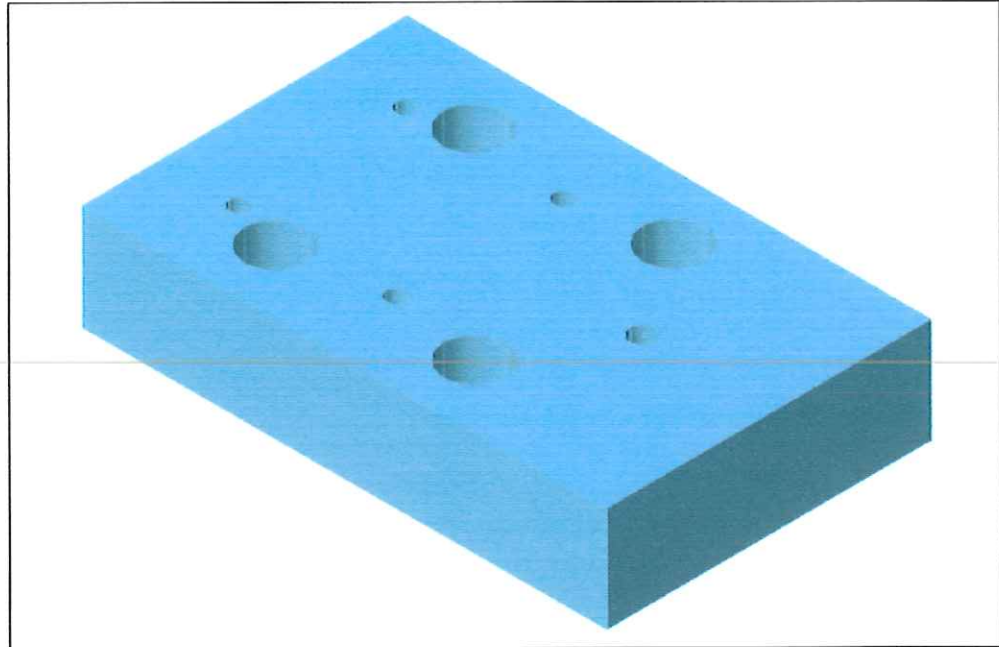


Figura 5.1- Primeiro dispositivo projetado

Observando o desenho da Figura 5.1, pode-se notar que esse dispositivo foi confeccionado em uma única peça de alumínio com disposição lateral do acelerômetro a ser calibrado e espelho refletor do sistema interferométrico laser.

Mesmo se fosse utilizado um acelerômetro padrão nesse dispositivo, não poderia ser afirmado que seu movimento oscilatório seria idêntico ao do excitador, pois poderia ser gerado movimentos vibratórios indesejáveis no bloco, devido a posição dos sensores, pois além de não haver uma concentricidade entre eles e o eixo longitudinal do excitador, há peso nas extremidades do dispositivo, que podem gerar vibrações impróprias quando ele for excitado.

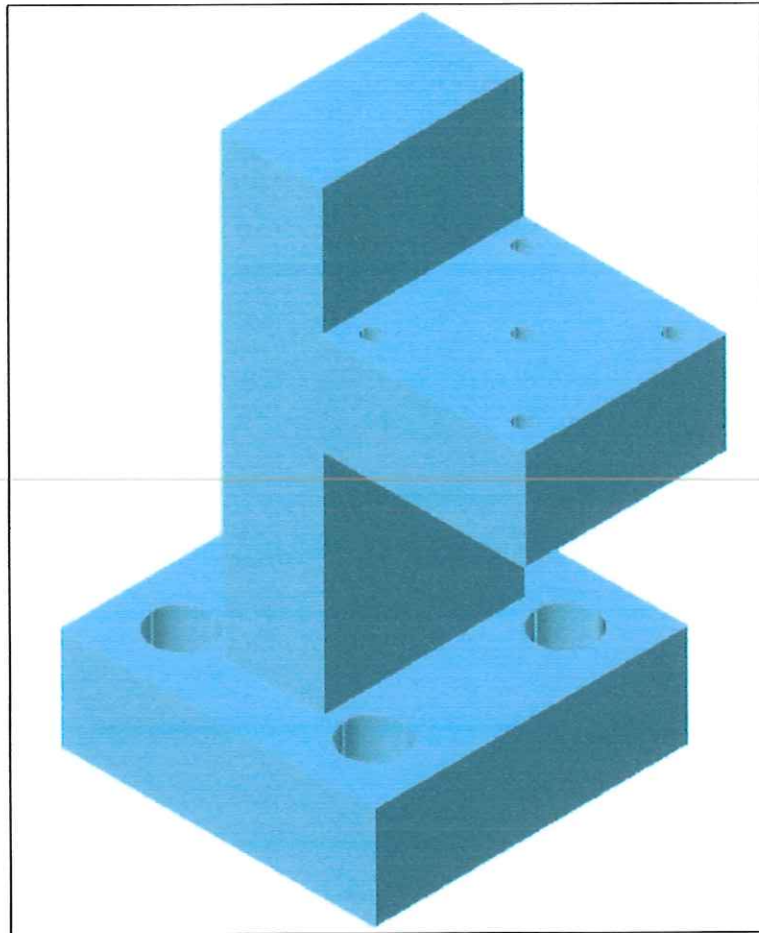


Figura 5.2- Segundo dispositivo projetado

No desenho mostrado na Figura 5.2, nota-se que o acelerômetro a ser calibrado e o espelho refletor ou acelerômetro padrão, estão alinhados no mesmo eixo longitudinal, mas não estão alinhados com o excitador.

Este tipo de montagem também gera oscilações indesejáveis na estrutura quando esta for excitada. Para solucionar esse problema foi utilizado um dispositivo especial que será mencionado mais adiante. Há também o inconveniente do tipo de acoplamento feito entre as duas partes desse dispositivo, também explicado adiante.



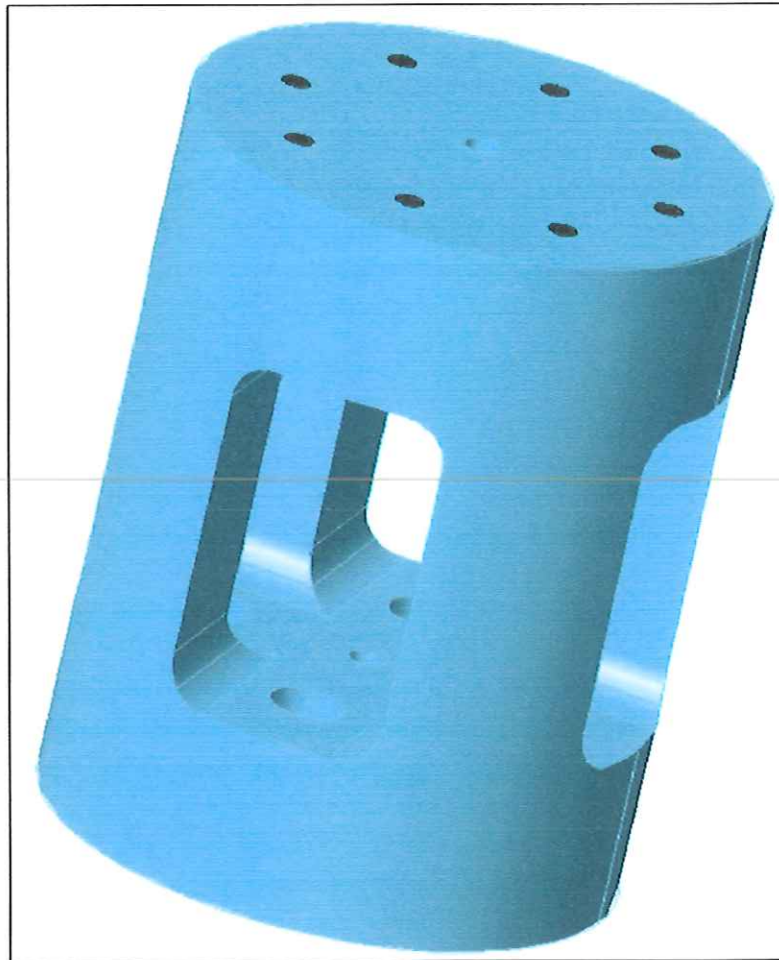


Figura 5.3- Terceiro dispositivo projetado

Observando o desenho da Figura 5.3, verifica-se a concentricidade entre os eixos longitudinais dos acelerômetros, espelho e excitador.

Outros tipos de dispositivos foram estudados, mas apenas os três modelos mostrados anteriormente foram projetados e construídos, como mostra a Figura 5.4, 5.5 e 5.6.



Figura 5.4- Construção final do primeiro dispositivo

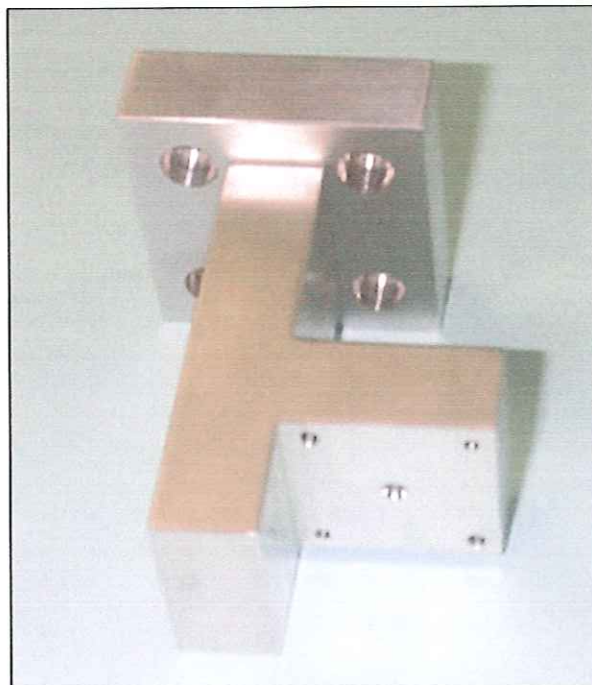


Figura 5.5- Construção final do segundo dispositivo

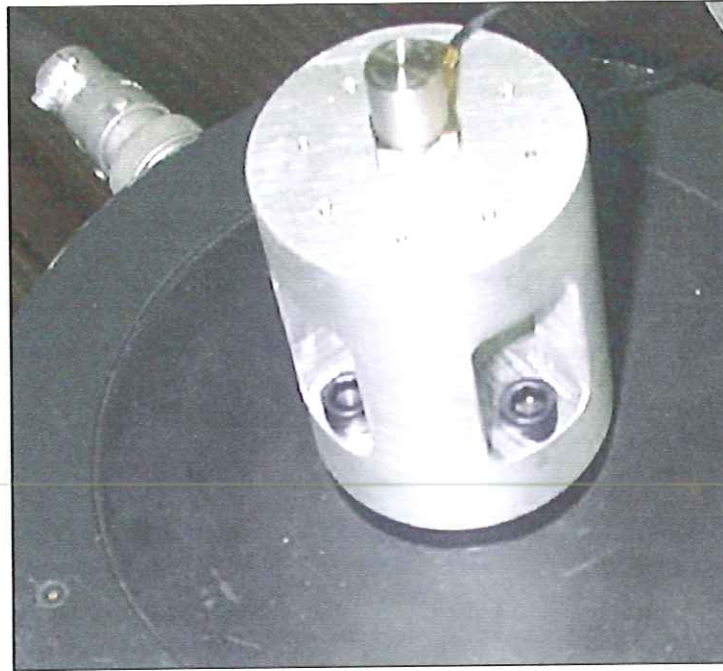


Figura 5.6- Construção final do terceiro dispositivo

O dispositivo da Figura 5.5 é composto de duas partes, ambas construídas em alumínio. Neste caso notou-se que: os parafusos utilizados para fixar essas partes entre si influenciam nas medidas, causando deste modo um erro de leitura do sinal e que também existem erros de medida devido aos sensores ou espelho refletor não estarem coincidentes com o eixo longitudinal do excitador. A montagem completa desse experimento está mostrada na Figura 5.7.

Usando este dispositivo, notou-se que os sensores ou espelho refletor passam a ter vibrações indesejáveis para a análise da calibração. Para evitar este problema, poderia-se desenvolver apoios de roletes para o dispositivo. Entretanto, devido à complexidade que o projeto se tornaria, vide Figura 5.8, isto não foi usado.



Figura 5.7-Montagem final com o segundo dispositivo

O dispositivo da Figura 5.4 não foi utilizado devido ao fato de quando for feito a montagem final com os acelerômetros ou espelho refletor, os mesmos não se encontrarem no mesmo eixo longitudinal em conjunto com o excitador. Este dispositivo foi o primeiro a ser desenvolvido e através dele se chegou ao projeto final, pois foi observadas todas as vantagens e desvantagens que ele oferecia.

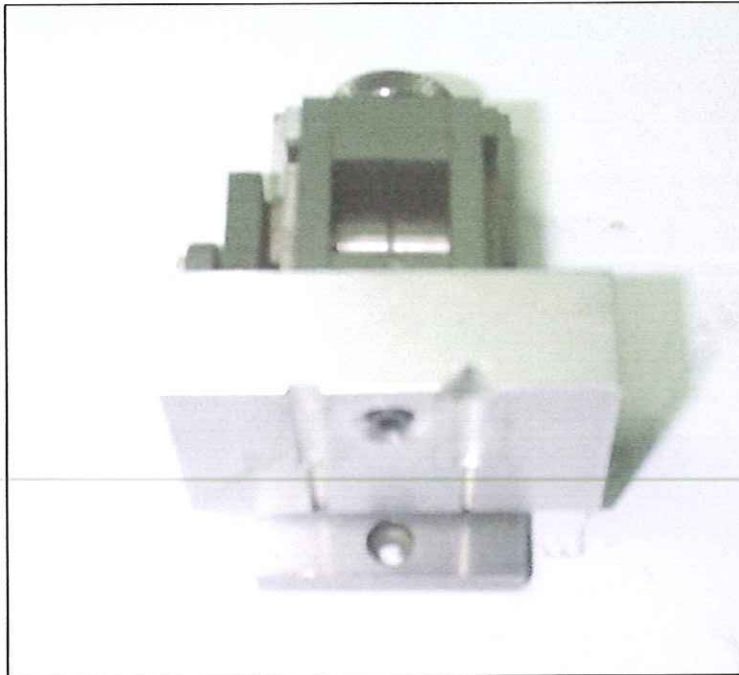


Figura 5.8- Suporte para roletes

O dispositivo da Figura 5.6 foi o que apresentou o melhor resultado entre eles. Nota-se que há uma simetria entre os transdutores e espelho refletor quando nele são fixados. Este dispositivo foi construído em uma única peça em alumínio, dispensando desse modo o uso de parafusos. Quando se aplica uma excitação nesse dispositivo, todos os acessórios nele fixados vibram num mesmo eixo longitudinal, eliminando desse modo o surgimento de oscilações diferenciadas entre ambos os sensores. A montagem ilustrada na Figura 5.9 mostra o sistema de calibração secundário desenvolvido. Na Figura 5.10 é mostrado a montagem final do sistema de calibração primário.

Foram desenvolvidos e projetados também vários outros dispositivos, para que fosse obtido os melhores desempenhos e níveis de respostas. O melhor desempenho foi conseguido com o dispositivo mencionado anteriormente, mostrado na Figura 5.6.



Figura 5.9–Calibrador secundário



Figura 5.10 – Calibrador primário.

Para aquisição dos sinais do sistema de calibração primário ou sistema de calibração secundário, foi utilizado um conjunto de equipamentos, composto por:

- 1 analisador de sinais B&K modelo 2032
- 2 condicionadores de sinais B&K modelo 2626
- 1 shaker B&K modelo 4808
- 2 acelerômetros B&K modelo 4383
- 1 gerador de sinais B&K modelo 1047
- 1 amplificador de sinais B&K modelo 2712
- 1 micro computador 486 DX2 66 MHz com placa de aquisição para captação dos sinais do sistema B&K
- 01 sistema interferométrico laser HP modelo 5519 A
- 01 micro computador Pentium I 133 MHz com placas de aquisição da HP para captação dos sinais do sistema interferométrico laser

---

# CAPÍTULO 6

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 - Testes Experimentais, Resultados e Discussões

Após a realização dos experimentos utilizando a configuração *back-to-back*, e fazendo a comparação dos resultados dos dois acelerômetros através de programas computacionais especialmente desenvolvidos para esse propósito, os seguintes gráficos foram obtidos:



A Figura 6.1 apresenta os resultados do ensaio realizado utilizando um sinal de varredura senoidal como excitação do sistema. A faixa de frequência utilizada foi de 5 Hz a 25,6 kHz.

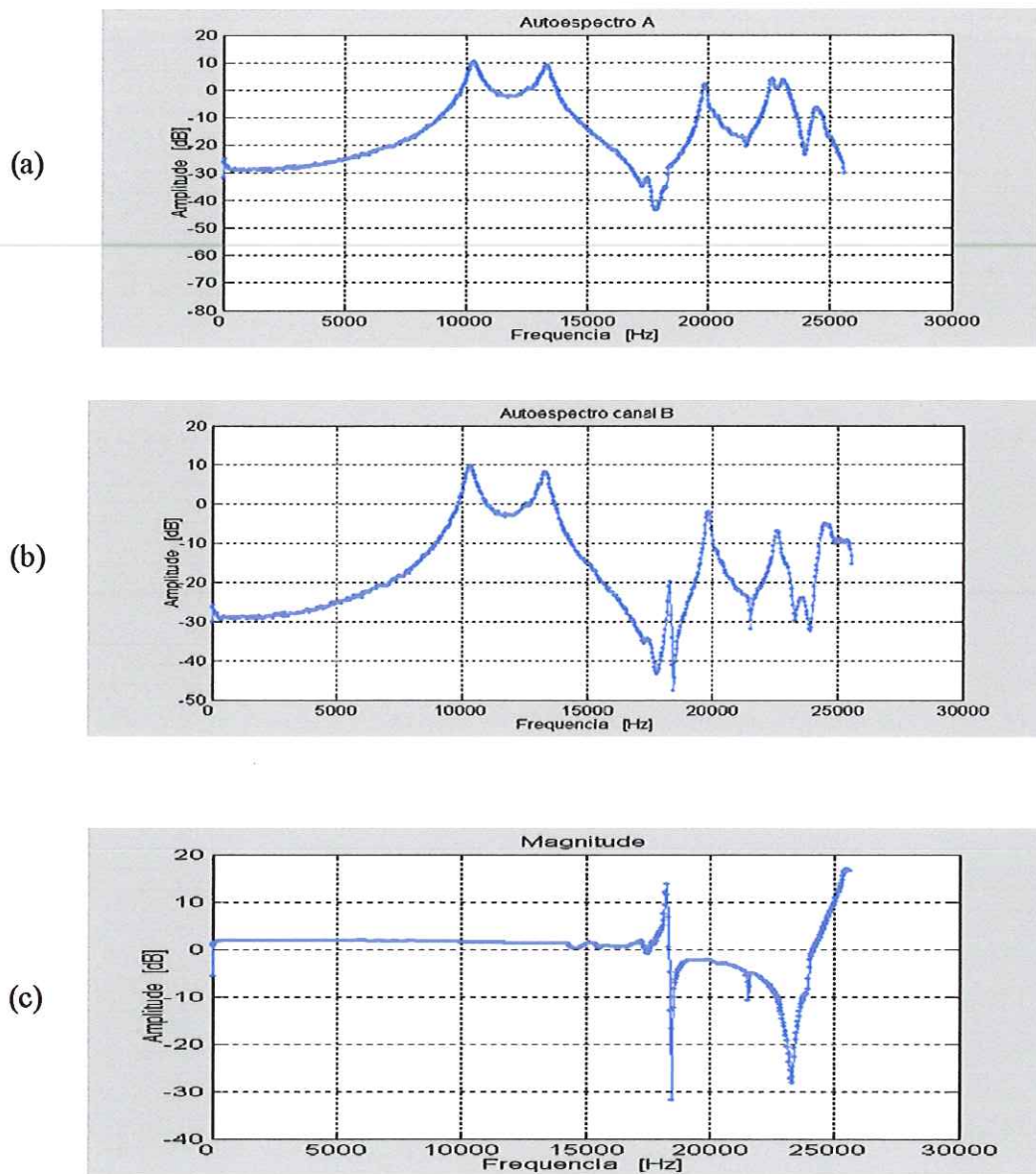


Figura 6.1 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 25,6 kHz.

Um dos objetivos deste primeiro ensaio é o de determinar qual a potencialidade do calibrador desenvolvido, principalmente a faixa de frequência de operação.

Os gráficos (a) e (b) da Figura 6.1 apresentam os autoespectros dos dois acelerômetros, o de referência e o a ser calibrado. Nota-se nestes dois gráficos um pico pouco acima de 10 kHz. Este pico está associado à primeira frequência natural do shaker (excitador) e era esperado, conforme se constata na especificação técnica deste equipamento, encontrado anexo ao final desta dissertação. Desta forma, a faixa de operação ideal do excitador vai até cerca de 10 kHz, apesar disso, este shaker pode operar em frequências mais altas, até cerca de 14 a 15 kHz. Deve-se observar a não existência de nenhum outro pico abaixo de 14 kHz. Desta forma, pode-se afirmar que o dispositivo de fixação dos acelerômetros foi corretamente projetado, com frequências naturais acima da primeira frequência natural do excitador.

O gráfico (c) da Figura 6.1 apresenta a comparação dos dois autoespectros anteriores. Pode-se notar uma boa resposta plana até cerca de 14 kHz. Este resultado delimita a frequência máxima de operação do conjunto shaker/dispositivo de fixação. Desta forma, o sistema de calibração por comparação "back-to-back" desenvolvido pode realizar a calibração de acelerômetros até 14 kHz com boa acuracidade.

A Figura 6.2 apresenta os resultados do ensaio realizado utilizando um sinal de varredura senoidal como excitação do sistema. A faixa de frequência utilizada foi de 5 Hz a 12,8 kHz.

Os gráficos (a) e (b) da Figura 6.2 apresentam os autoespectros dos dois acelerômetros. O gráfico (c) da Figura 6.2 apresenta a comparação dos dois autoespectros anteriores. Pode-se notar uma excelente resposta plana até cerca de 6 kHz, e um desvio máximo menor que 1 dB entre os dois acelerômetros em toda a faixa de excitação, caracterizando um excelente resultado. A origem dos desvios que ocorrem acima de 6 kHz estão relacionados às naturais diferenças entre os dois acelerômetros.

Novamente, pode-se verificar um pico pouco acima de 10 kHz nas respostas dos dois acelerômetros, correspondente à primeira frequência natural do shaker.

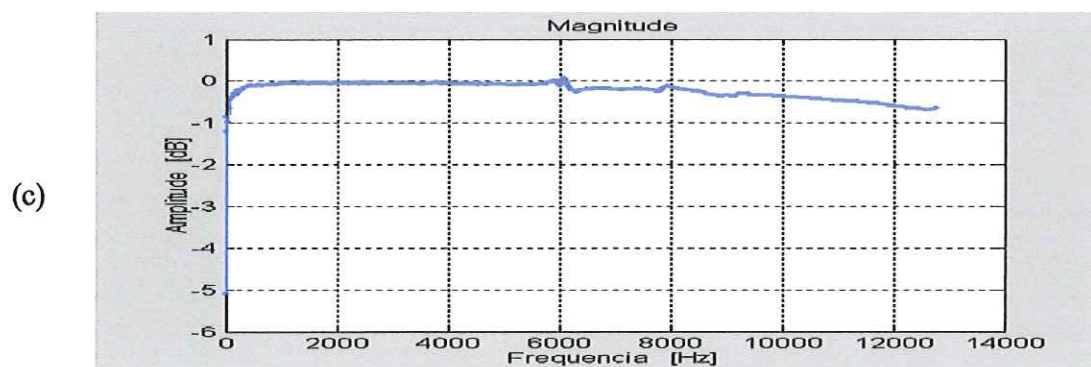
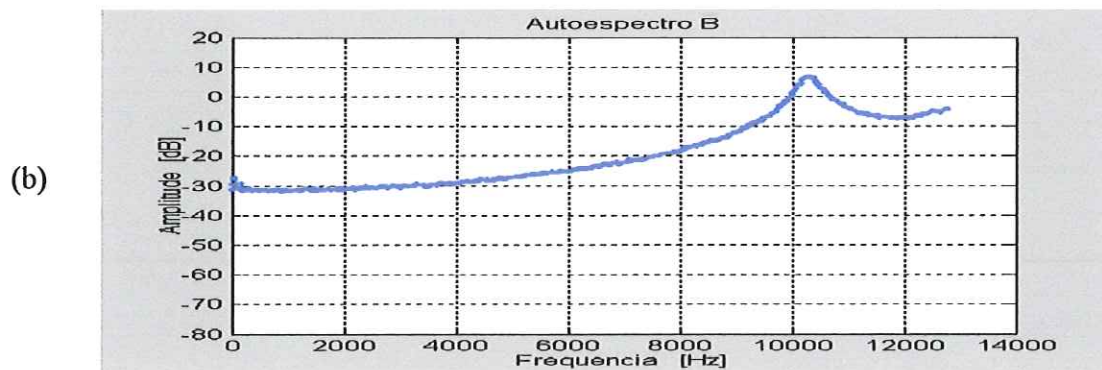
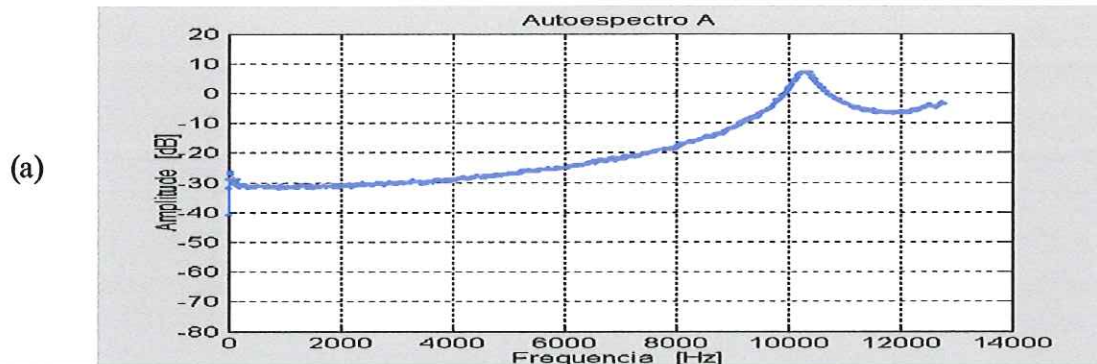


Figura 6.2 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 12,8 kHz.

A Figura 6.3 apresenta os resultados do ensaio realizado utilizando um sinal de varredura senoidal como excitação do sistema. A faixa de frequência utilizada foi de 5 Hz a 6,4 kHz.

Os gráficos (a) e (b) da Figura 6.3 apresentam os autoespectros dos dois acelerômetros. O gráfico (c) da Figura 6.3 apresenta a comparação dos dois autoespectros anteriores. Pode-se notar uma excelente resposta plana entre 1 kHz e 6 kHz, com um desvio máximo menor que 0,2 dB entre os dois acelerômetros. Verifica-se um pequeno desvio, menor que 1 dB, entre as respostas dos dois acelerômetros nas frequências abaixo de 1 kHz. Este resultado é esperado, pois se utilizou uma velocidade de varredura constante. Este resultado pode ser melhorado aplicando-se velocidades de varredura mais baixas ou utilizando um gerador de varredura senoidal programável com velocidade variável.

As Figuras 6.4 a 6.8 apresentam os resultados dos ensaios realizados utilizando sinais de varredura senoidal como excitação do sistema. As faixas de frequências utilizadas nestes ensaios foram: para a Figura 6.4 de 5 Hz a 3,2 kHz, para a Figura 6.5 de 5 Hz a 1,6 kHz, para a Figura 6.6 de 5 Hz a 800 Hz, para a Figura 6.7 de 5 Hz a 400 Hz, e para a Figura 6.8 de 5 Hz a 100 Hz.

Em todos estes gráficos as Figuras (a) e (b) apresentam os autoespectros dos dois acelerômetros e o gráfico (c) apresenta a comparação destes dois autoespectros. Todos estes gráficos apresentam resultados semelhantes aos obtidos na Figura 6.3, ou seja, excelente resposta plana em praticamente toda a faixa de frequência de excitação, com desvios muito abaixo de 1 dB, com exceção da faixa abaixo de 100 Hz. Pode-se observar que ao se estreitar a faixa de excitação melhora-se consideravelmente a resposta em baixa frequência. A Figura 6.8 apresenta um desvio máximo de cerca 1 dB na faixa de 5 Hz a 100 Hz. Provavelmente boa parte deste desvio pode ser atribuída às diferenças naturais entre os dois acelerômetros e amplificadores utilizados. Uma metodologia está sendo desenvolvida para se quantificar melhor os desvios devido aos amplificadores e toda a eletrônica utilizada. Esta metodologia baseia-se na troca de canais do analisador de Fourier e dos amplificadores utilizados.

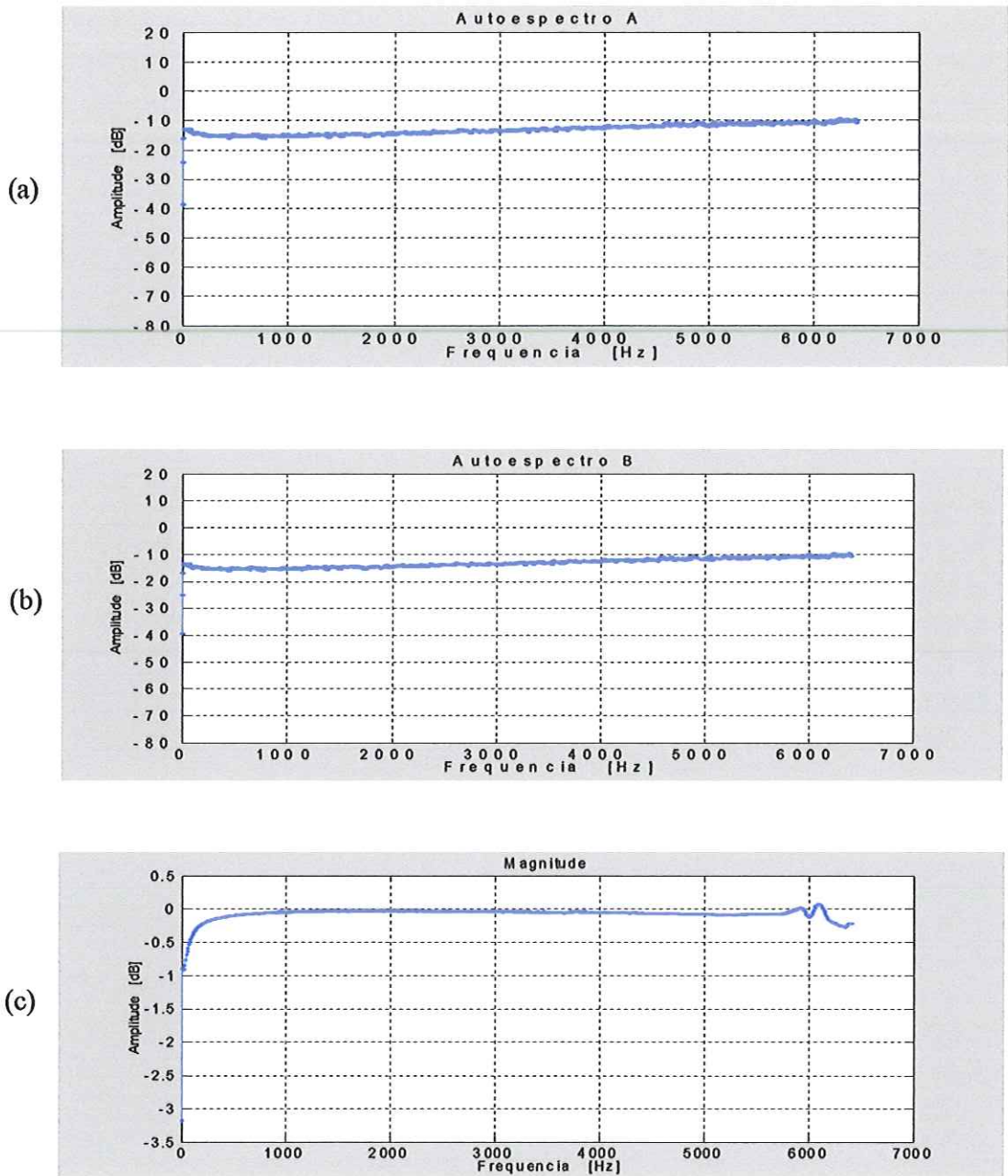
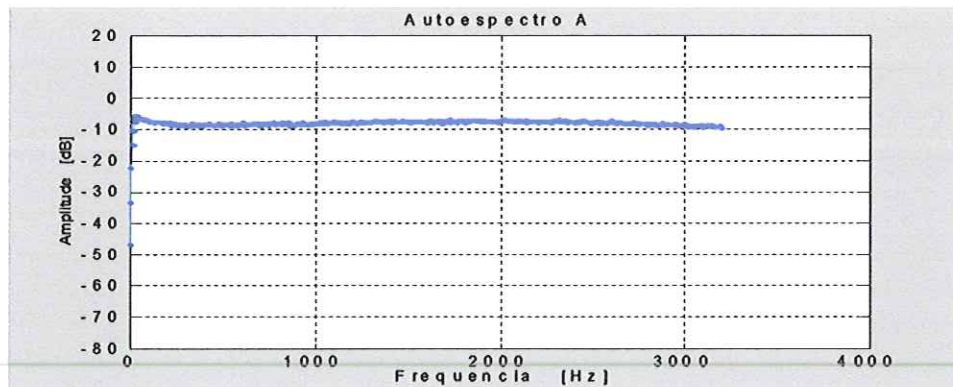
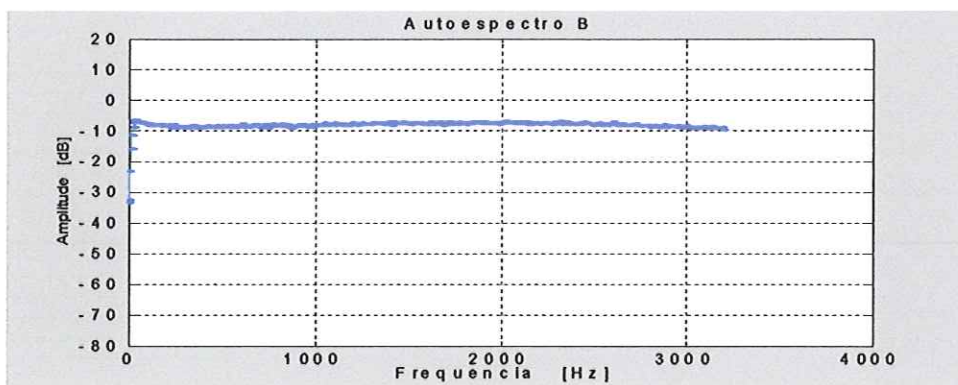


Figura 6.3 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 6,4 kHz.

(a)



(b)



(c)

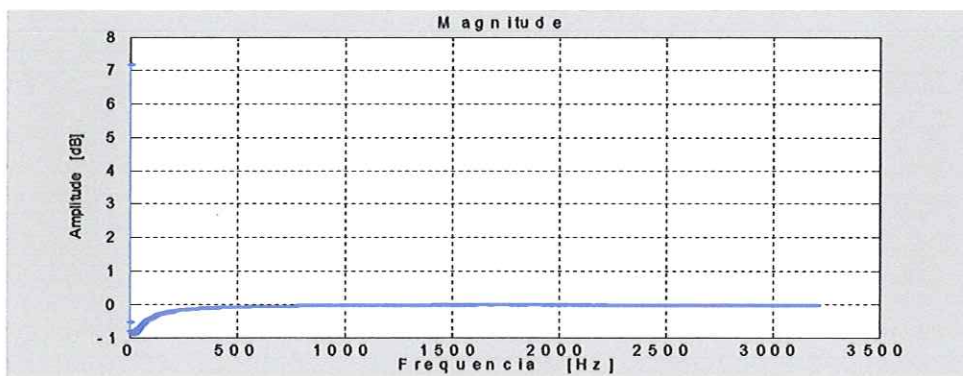


Figura 6.4 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 3,2 kHz.

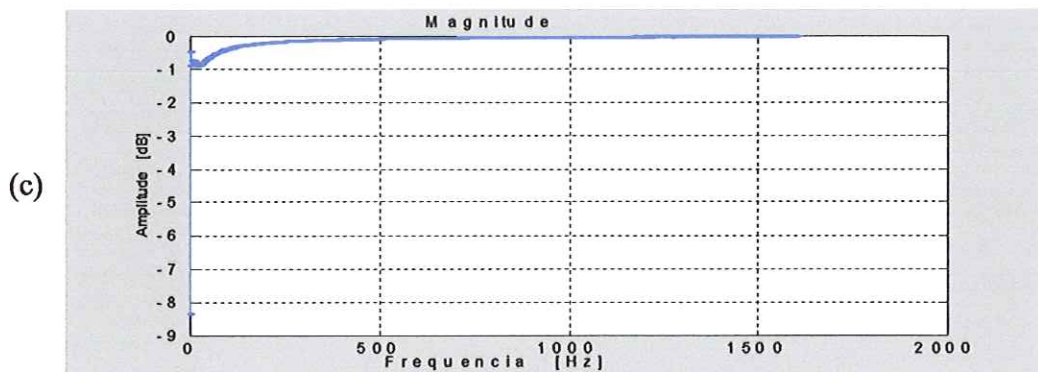
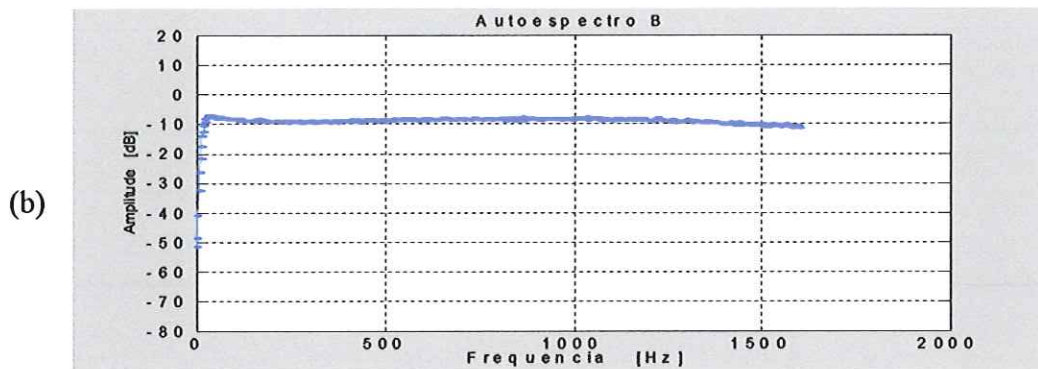
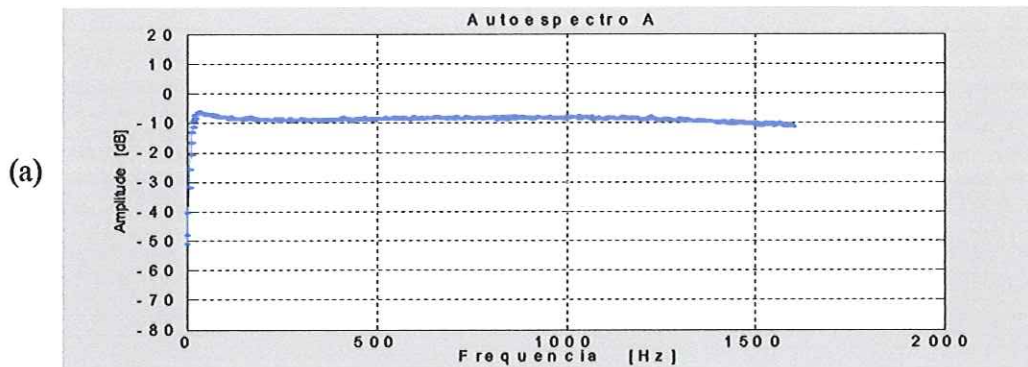


Figura 6.5 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 1,6 kHz.

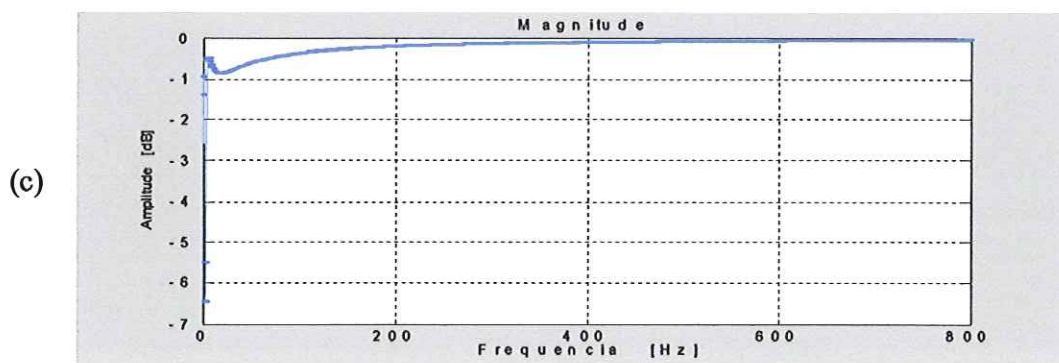
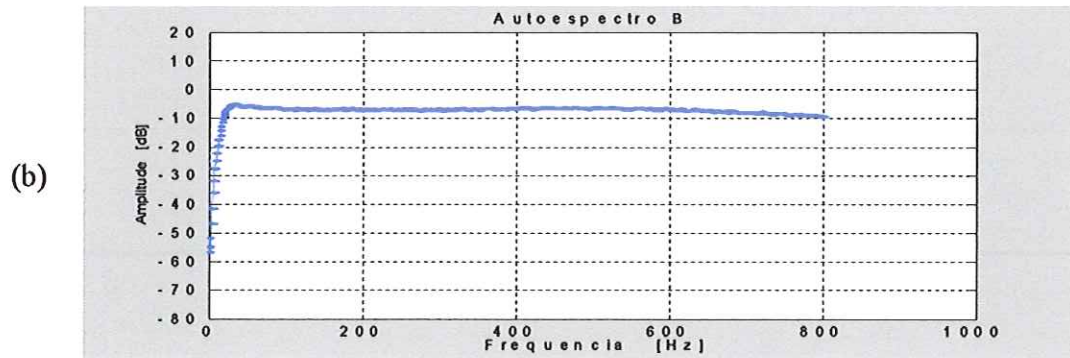
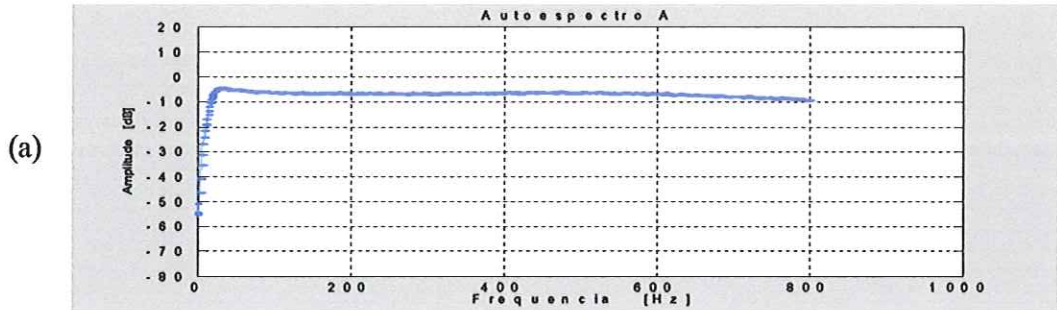


Figura 6.6 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 800 Hz.



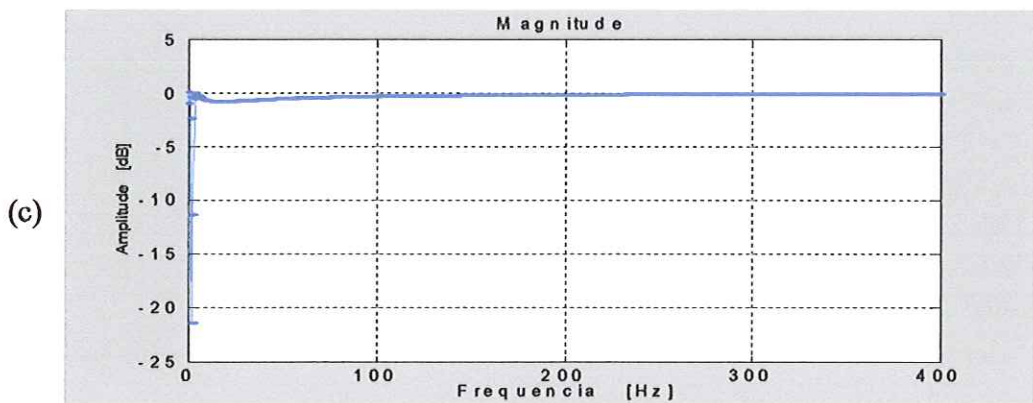
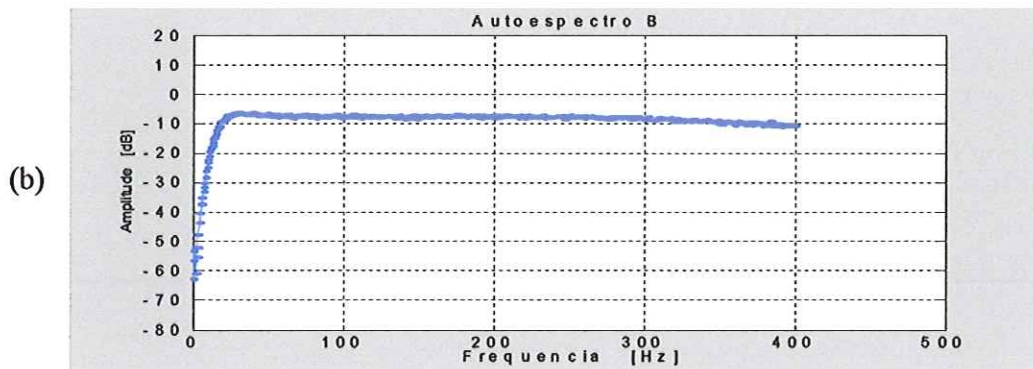
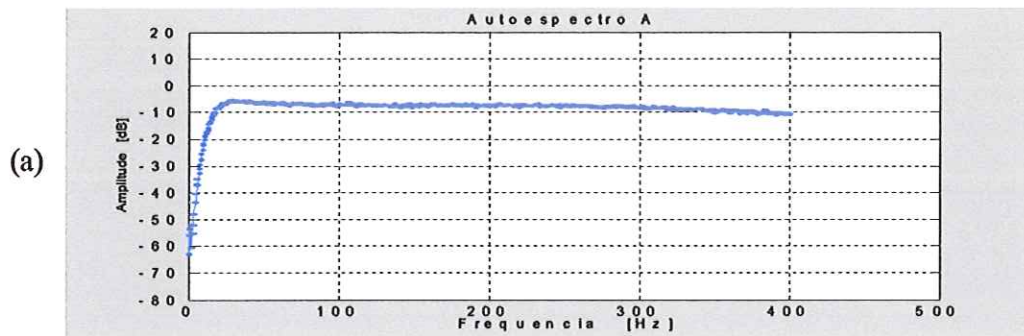


Figura 6.7 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 400 Hz.

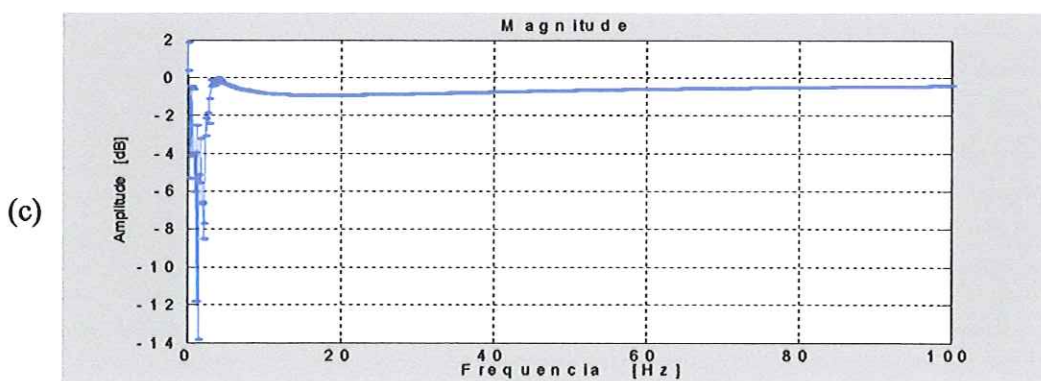
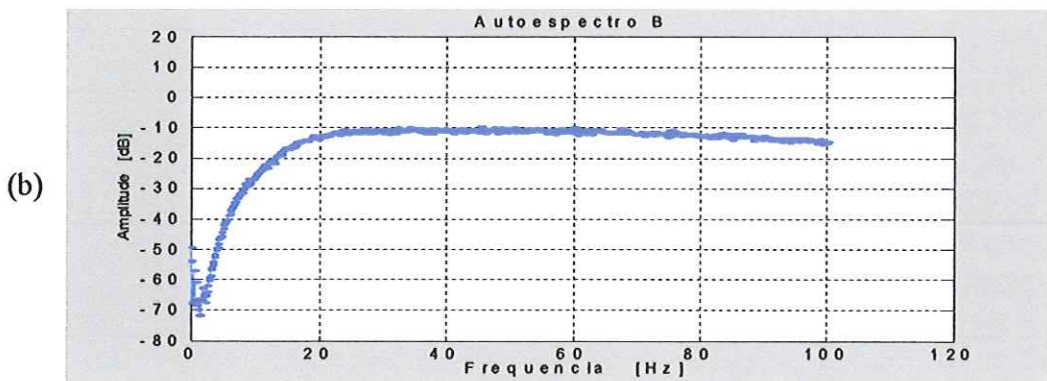
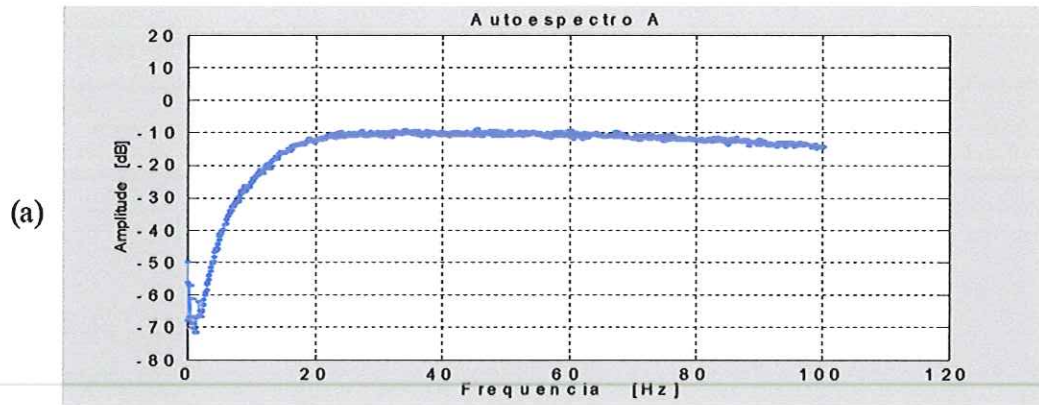


Figura 6.8 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 100 Hz.

## Sistema de Calibração Primário - Interferometria Laser

A Figura 6.9 apresenta os resultados do ensaio realizado com o sistema interferométrico laser como padrão. O shaker excitou o sistema com um sinal de varredura senoidal na faixa de frequência entre 5 Hz e 12,8 kHz. O gráfico da figura mostra a comparação dos autoespectros do acelerômetro e do laser. Pode-se verificar que o laser apresenta um limite operacional de 10,2 kHz. Os resultados mostram boa concordância entre os resultados em toda a faixa operacional do laser, representado pela curva praticamente plana entre 5 Hz e 10 kHz, com desvios máximos de menos de 0,3 dB. Não se verificou qualquer problema com a ótica do retrorefletor do laser, que foi excitado em conjunto com o acelerômetro. Os bons resultados indicam que o programa de cálculo do autoespectro, com a aplicação de “janelas” e médias, também se mostrou eficiente e adequado para a calibração de acelerômetros. O sistema também apresentou bom desempenho quando excitado em faixas de frequências mais estreitas.

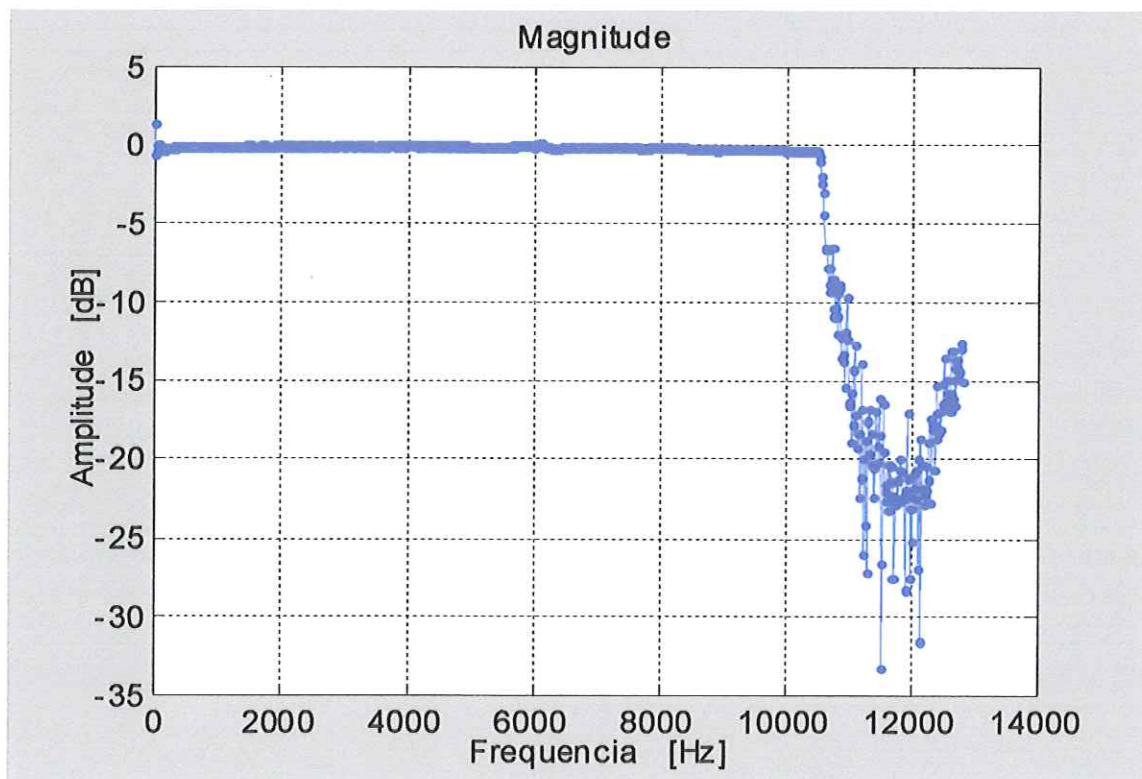


Figura 6.9 – Excitação –varredura senoidal - 5 Hz a 12,8 kHz.

A Figura 6.10 apresenta os resultados comparativos dos autoespectros do acelerômetro e laser para uma excitação senoidal fixa de 159,2 Hz. Esta frequência de excitação foi escolhida por ser utilizada como padrão por alguns fabricantes. É nesta frequência que alguns fabricantes definem a sensibilidade dos acelerômetros.

Os resultados não foram suficientemente satisfatórios para se determinar a sensibilidade com este tipo de excitação. Algumas dificuldades inerentes ao sistema eletrônico do laser, como a impossibilidade de seleção de uma frequência de aquisição idêntica ao do analisador de Fourier, tornaram estes resultados difíceis de serem analisados e interpretados. De qualquer forma, os resultados com a excitação do tipo varredura senoidal se mostraram muito superiores para a determinação da sensibilidade, como mostram o gráfico da Figura 6.9.

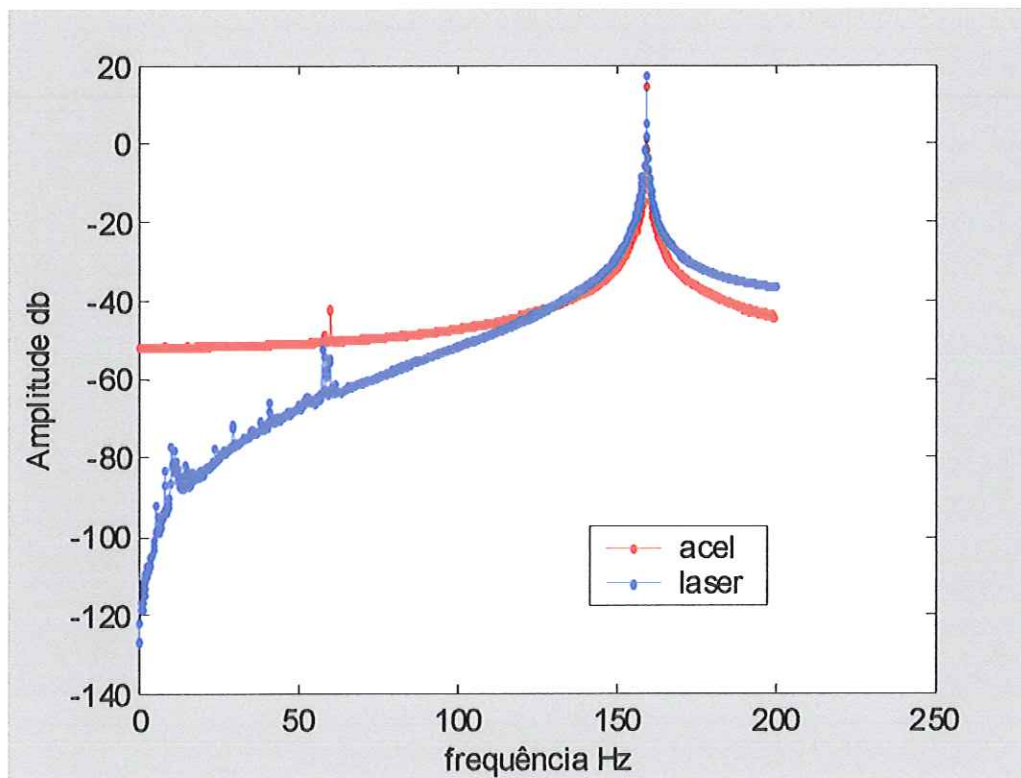


Figura 6.10 – Excitação – senoidal fixa - 159,2 Hz (1000 rad/s).

---

# **CAPÍTULO 7**

## **Conclusões**

Neste trabalho, foi apresentado o estudo e o desenvolvimento de dois sistemas para a calibração de acelerômetros.

O sistema desenvolvido teve por objetivo assegurar que os benefícios da medição rastreável estejam presentes conferindo um certo grau de confiabilidade. Na busca do estabelecimento de vínculos entre a medição e os padrões fundamentais, obteve-se a rastreabilidade através de uma

cadeia contínua de medições até a grandeza fundamental conforme estabelecido pela ISO 9001.

Após o desenvolvimento teórico e experimental executados durante o desenvolvimento do presente trabalho algumas conclusões podem ser destacadas:

- ✓ O método proposto mostrou-se especialmente importante nas aplicações rotineiras de calibração de acelerômetros nas oficinas e laboratórios que não dispõe de equipamentos especializados.
- ✓ O método proposto mostrou-se eficiente na comparação dos resultados finais.
- ✓ O interferômetro laser mostrou-se eficiente na calibração dos acelerômetros para as frequências de até 1 KHz. Essa limitação foi imposta pelo "hardware" do sistema.
- ✓ A calibração dos acelerômetros nas frequências mais altas deve ser realizada com um acelerômetro padrão de transferência na montagem do tipo "back-to-back".
- ✓ A faixa de calibração poderia ser mais estendida utilizando o sistema laser interferométrico se este fosse um vibrômetro laser, que é um equipamento utilizado especialmente para medir vibrações mecânicas.

## **Trabalhos futuros**

Como resultados destas observações e conclusões, podem ser feitas algumas propostas para futuros trabalhos, relacionadas a seguir:

1. Automação do processo de calibração de acelerômetros em toda faixa de trabalho.
  2. Ampliação da faixa de frequência de calibração através do interferômetro laser.
  3. Projeto e desenvolvimento de novos dispositivos.
-

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUEL&KJAER, (1982). Measuring Vibration. Naerum, B&K.

CHU, A.; ELLER, E. E.; WHITTIER, R. M. (1996). Vibration Transducer. In: HARRIS, C. M., ed. Shock and Vibration Handbook. 4 ed. New York, Mcgraw-Hill. Cap. 12, p.12.1-12.39.

LICHT, T. R.; ZAVERI, K. (1981). Calibration and Standards Vibration and Shock Measurements. B&K Technical Review, No.4. SERBYN, M. R.; LIN, J. (1996), Calibration of Pickups. In: HARRIS, C. M., ed. Shock and Vibration Handbook. 4 ed. New York, Mcgraw-Hill. Cap. 18, p. 18.1–18.32.

MACCONNELL, K. G. (1995), "Vibration Testing" Theory and Practice.

MARTENS, H. J. et al (2000), "Traceability of Vibration and Shock Measurements by Laser Interferometry". Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Furstenwalder Damn 388, D-12587 Berlin, Germany.



SERBYN, M. R.; LIN, J. (1996), Calibration of Pickups. In: HARRIS, C. M., ed. Shock and Vibration Handbook. 4 ed. New York, Mcgraw-Hill. Cap. 18, p. 18.1–18.32.

SERRIDGE, M.; LITCHT, T. R. (1987), “Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook” Theory and Application Handbook.

SILVA, A. A. (1998). Detecção e Análise Dinâmica de Falhas em Rolamentos. São Carlos. 209p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SELEGHIM, JR. PAULO (1990). Análise Dinâmica de uma Placa Cantilever pelo Método da Superposição. São Carlos, 119 p. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KEVIN J. RUST (1997). Introduction to Accelerometers and Calibration Techniques. MTS Systems Corporation

F. G. TIZZER; H. C. HARDY (1950). Accelerometer Calibration Technique. The Journal of the Acoustical Society of America. Armour Research Foundation of Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois.

J. S. NISBET; J. N. BRENNAN AND H. I. TARPLEY (1959). High-Frequency Strain Gage and Accelerometer Calibration. The Journal of the Acoustical Society of America. The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.

RONALDO DA SILVA DIAS; GUSTAVO PALMEIRA RIPPER E GILMAR MACHADO XIMENES (1999). Calibração de Transdutores de Vibração. Laboratório de vibrações do INMETRO.

J. N. BRENNAN AND J. S. NISBET (1957). Direct Method of Accelerometer Calibration. The Journal of the Acoustical Society of America. Department of engineering Research, the Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.

C. S. VELDMAN (1996). The Cost of Vibration Calibration to Industry. Acoustics and Vibration Electrical Metrology. National Metrology Laboratory.

ALFRED LINK AND HANS-JÜRGEN VON MARTENS (1998). Amplitude and Phase Measurement of Sinusoidal Vibration in the Nanometer Range Using Laser Interferometry. Measurement. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Abbestrasse.

C. M. SUTTON (1990). Accelerometer Calibration by Dynamic Position Measurement Using Heterodyne Laser Interferometry. Metrologia. Physics and Engineering Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research. Lower Hutt, New Zealand.

KEVIN J. RUST (1997). Introduction to Accelerometers and Calibration Techniques. MTS Systems Corporation.

ISO (1993). Guide to the Expression of uncertainty in measurement.

## **Anexo**

---

# **Especificações Técnicas dos Equipamentos**

# PRODUCT DATA

## PM Vibration Exciter — Type 4808

### USES

- Vibration testing
- Mechanical impedance measurements
- Educational demonstrations
- Structural response testing
- Vibration transducer calibration

### FEATURES

- Force rating 112 newton (25 lbf) sine peak (187N (42 lbf) with cooling)
- Frequency range 5 Hz to 10 kHz
- First axial resonance 10 kHz
- Maximum bare table acceleration  $700 \text{ m/s}^2$  (71 g)
- Rugged construction
- Low cross motion and low distortion
- Lapped and hardened surface
- Replaceable inserts for moving element protection
- Robust rectilinear guidance system
- Highly damped axial, transverse and flexural resonances
- Continuous 12.7 mm (0.5 in) peak-to-peak displacement with overtravel stops
- Interconnecting cable with two high-quality, 4-pin Neutrik Speakon connectors



---

## Description

---

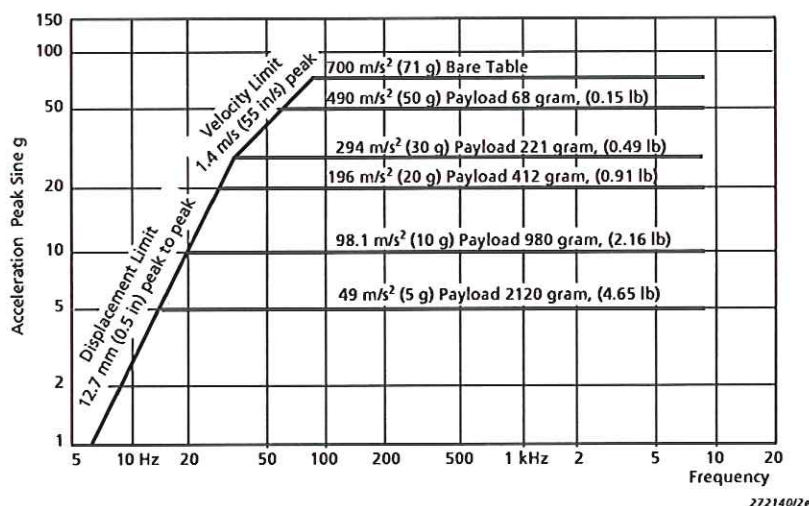
Designed for long, trouble-free operation, Vibration Exciter Type 4808 is a high-quality compact machine with a permanent magnetic field. It has a force rating of 112 newton (25 lbf) enabling relatively heavy loads to be excited to high g levels. The 4808 will normally be driven by Power Amplifier Type 2719 rated at 180 VA but can also be driven by any amplifier up to a maximum input current of 15 A RMS without assisted cooling.

The moving element is supported by a robust rectilinear guidance system consisting of grouped radial and transverse flexures in a unique construction. The flexures are made from a bonded sandwich of spring steel and a damping elastomer, providing a clean acceleration waveform with low cross motion and low distortion characteristics.

4808

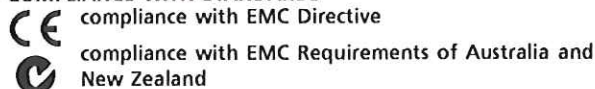
Brüel & Kjær 

**Fig. 1**  
Sine performance curves for Vibration Exciter Type 4808 for operation without assisted cooling



## Specifications – PM Vibration Exciter Type 4808

### COMPLIANCE WITH STANDARDS



**Safety, EMC Emission and Immunity:** According to relevant standards: EN 61010-1, IEC 61010-1, UL 3111-1, EN 50081-1/2, IEC 61000-6-1/2/3/4, EN 61326-1, CISPR22 Class B limits, FCC Rules Part 15, EN 50082-1/2, EN 61326-1

**Temperature:** According to IEC 60068-2-1 & IEC 60068-2-2

**Operating temperature:** +5 to +40°C (41 to 104°F)

**Storage temperature:** -25 to +70°C (-13 to 158°F)

**Humidity:** According to IEC 60068-2-3, Damp Heat: 90% RH (non-condensing at 40°C (104°F))

**Mechanical:** Non-operating according to IEC 60068-2-6, IEC 60068-2-27, IEC 60068-2-29

### SPECIFICATIONS

**RATED FORCE:** 112 N, 25 lbf sine-peak (with assisted air cooling 187 N, 42 lbf peak)

**FREQUENCY RANGE:** 5 Hz to 10 kHz bare table

**AXIAL RESONANT FREQUENCY:** 10 kHz bare table

**MAXIMUM BARE TABLE ACCELERATION:** 700 m/s<sup>2</sup> (71 g)

**MAXIMUM DISPLACEMENT:** 12.7 mm (0.5 in) peak-to-peak

**MAXIMUM VELOCITY:** 1.4 m/s (55 in/s)

**DYNAMIC WEIGHT OF MOVING ELEMENT:** 160 gram (0.35 lb)

**STATIC FLEXURE STIFFNESS:** 5.6 N/mm (32 lbf/in)

**MAXIMUM INPUT CURRENT:** 15 A RMS (with assisted air cooling 25 A RMS)

### CURRENT-TO-FORCE RATIO

Coils in parallel: approximately 0.16 A/F (sine peak)

Coils in series: approximately 0.08 A/F (sine peak)

### STRAY MAGNETIC FIELD

20 × 10<sup>-3</sup> Tesla at table face

8 × 10<sup>-3</sup> Tesla at 12.7 mm (0.5 in) above table face

**COIL IMPEDANCE:** Approximately 0.8 Ω at 500 Hz with bare table and coils in parallel

**TABLE SIZE:** 62.5 mm (2.45 in) diameter

**FASTENING THREAD:** 5 × 5/16" – 18 UNC for M5 and 10–32 UNF inserts. 1 central insert plus 4 equi-spaced on circle of Ø50.8 mm

**TOTAL WEIGHT:** 35 kg (77.1 lb.)

### DIMENSIONS

**Diameter:** 215 mm (8.46 in)

**Height:** 200 mm (7.87 in)

## Ordering Information

Type 4808	PM Vibration Exciter
includes the following accessories:	
AQ0649	Interconnecting Cable (two Neutrik 4-pin Speakon Plug + AG 0007)
10 × YS0810	Thread inserts (M5)
10 × YS0811	Thread inserts (10–32 UNF)
1 × QA0061	Insert Mounting Tool
2 × YM2002	Blanking Plugs
1 × QS0003	Bottle of Loctite thread cement

## Optional Accessories

WZ0066	Nylon Stinger Kit
UA1596	Five push/pull steel stingers, dia. 2.5 mm
UA1597	Five push/pull steel stingers, dia. 3.5 mm
Type 8001	Impedance Head
EE0357	ENDEVCO Model 2312 Force Transducer
EE0112	ENDEVCO 2311-1 ISOTRON® Force Transducer
EE0113	ENDEVCO 2311-10 ISOTRON Force Transducer
EE0114	ENDEVCO 2311-100 ISOTRON Force Transducer
EE0115	ENDEVCO 2311-500 ISOTRON Force Transducer
UA0125	Mounting Equipment (including isolated studs YP0150 and non-isolated studs YQ2960)
WA0309	Trunnion
EE5227-002	Bushing Adaptor, 10–32 UNF to ¼–28 UNF
EE5004	Adaptor, Male 10–32 UNF to Male ¼–28 UNF

## Cables and Connectors with Old Type 2712

JJ0500	Plug must be soldered onto AQ0649 Cable where one Neutrik 4-pin Speakon plug is first removed
--------	---

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice.

# System Data

## Calibration Systems — Types 9636, 9610

### USES:

- Vibration transducer calibration
- Fulfilment of legal and contractual obligations such as ISO 9000

### 9636:

- Primary system using laser light as an absolute reference
- For calibration results of the highest accuracy
- Recommended system for producing primary, transfer and working reference standards

### 9610:

- Secondary system using working reference standards from primary systems like the Type 9636
- Fast and easy high-accuracy calibration requiring little calibration skill
- Recommended system for calibrating large numbers of transducers

### FEATURES:

- Turn-key delivery including installation and training

### 9636:

- Calibration accuracy: 50 to 499 Hz, 0.5%; 500 to 5 kHz, 0.8% at a 95% Confidence Level
- Easy-to-align Michelson interferometer with transverse mount for moving the interferometer in the horizontal plane

### 9610:

- Typical calibration time of 3 to 10 minutes
- PC-based semi-automatic software control
- Database with complete product data setup and room for a large number of measurements
- Calibration accuracy 5 to 10 Hz: 0.99%, 10 Hz to 4 kHz: 0.91%, 4 to 7 kHz: 1.4%, 7 to 10 kHz: 2.0% at a 95% Confidence Level



## Primary Vibration Transducer Calibration System Type 9636

The Primary Vibration Transducer Calibration System Type 9636 follows the guidelines given in ISO publication 5347, "Methods of calibration of vibration and shock pick-ups", paragraph 6.2.1, "Calibration method by measuring displacement amplitude and frequency".

The method is an absolute one in which the displacement amplitude is measured via laser interferometry.

The accelerometer to be calibrated is mounted on a vibration table, excited sinusoidally at a known frequency and the measured peak-to-

peak amplitude of the displacement of the table permits the exact acceleration to be calculated.

The System Type 9636 is a turn-key system which is installed by a Brüel & Kjær calibration engineer.

## Vibration Transducer Calibration System Type 9610

The Vibration Transducer Calibration System Type 9610 is an easy-to-use PC-based system which, after a few preliminary manual control settings, enables automatic calibration of a wide range of accelerometers and velocity pick-ups.

To ensure high calibration accuracy, special attention has been paid to system and standard verifications. The system verification involves a series of automatic measurements to check that the system is warmed up and producing stable measurement results.

The standard verification ensures that the Standard Reference Accelerometers Type 8305 and Calibration Sets Type 3506, which are used as charge and voltage standards, are within the tolerance for valid calibration measurements. The calibration system must pass the verification tests before a valid calibration can be performed.

The System Type 9610 is a turn-key system which is installed by a Brüel & Kjær calibration engineer.

## Overview

Brüel & Kjær calibration systems have been developed to provide the best possible foundation for confidence in vibration measurements.

Calibration is a way in which to establish a link to a physical quantity within a defined degree of accuracy. For legal or contractual reasons you may require evidence of the accuracy of a transducer – perhaps with respect to international standards.

If you are using an accelerometer in a particular set-up or environment in which the performance of the accelerometer has not been documented in its calibration chart, it will be necessary to perform a calibration for that particular application.

## Methods

Calibration information is often more than a sensitivity test. It may include frequency response, capacitance and weight as well as environmental effects.

Sensitivity calibrations can be divided into three distinct groups:

- Absolute methods, including laser interferometry and reciprocity techniques.
- Comparison methods, including the back-to-back method
- Calibrators, involving the use of a vibration exciter of known vibration level (simple instrument calibration, described elsewhere).

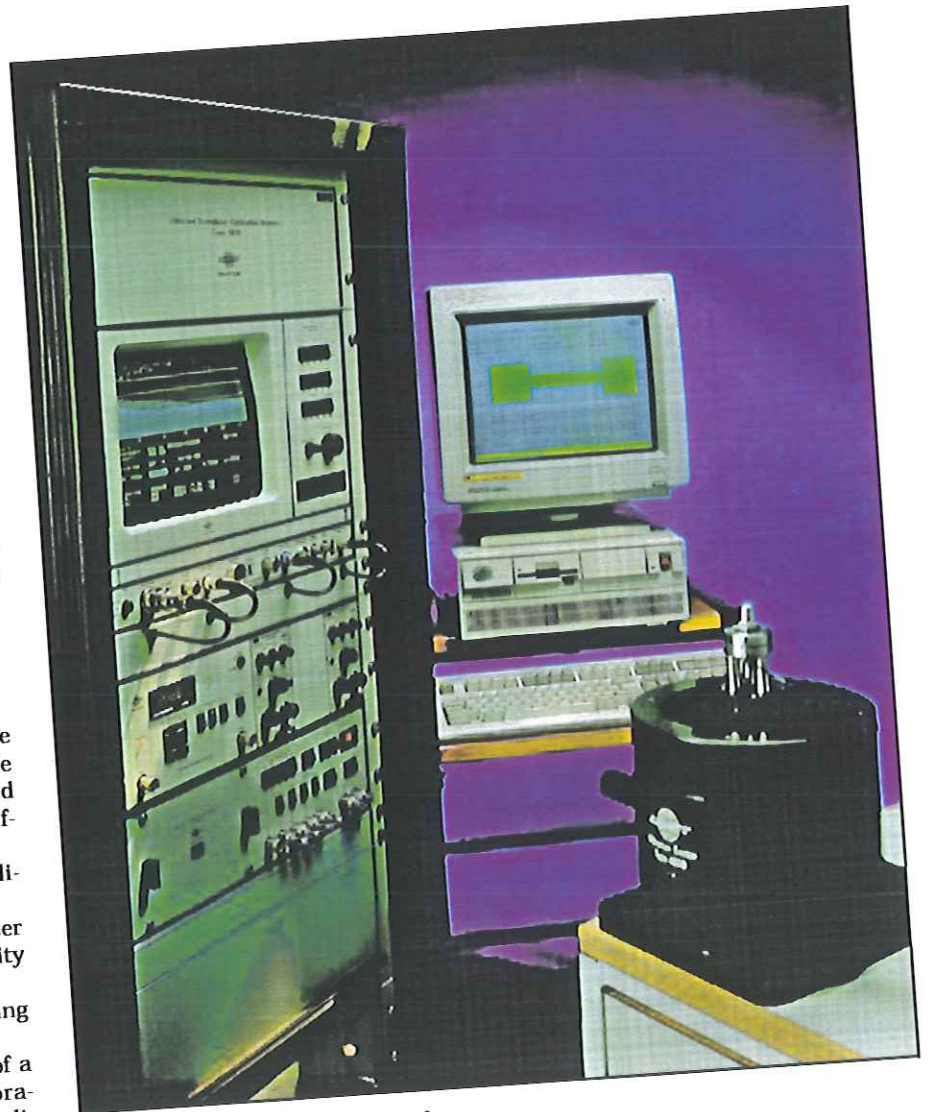


Fig. 1 Calibration System Type 9610

## Laser Interferometry (System 9636)

### Principles

In this method of calibration, the accelerometer to be calibrated is mounted on a vibration table which is excited sinusoidally at a known frequency. Measurement of the peak-to-peak amplitude of displacement of the table permits the acceleration to be calculated. The sensitivity is obtained by measuring the electrical output of the accelerometer and dividing by the acceleration.

Frequency, the reciprocal of period, is measured in  $s^{-1}$  (Hz), while the displacement is measured in metres (in practice, sub-multiples of metres). As seconds and metres are SI base units, the output is measured in volts or coulombs, SI derived units. The method is therefore an absolute one.

At the calibration frequency of 160 Hz an acceleration of  $10\text{ ms}^{-2}$  RMS corresponds to  $20.0\mu\text{m}$  peak-to-peak displacement, and the most practical method of measuring this relatively small amplitude to much better than 1% is an optical interferometric one using a helium-neon laser with a wavelength of  $632.8\text{ nm}$ .

The apparatus takes the form of a Michelson interferometer, with a beam splitter and two mirrors, one fixed and one formed of the upper surface of the accelerometer to be calibrated. A photodetector with a fast response is located in the re-combined light beam, where it detects a succession of intensity maxima and minima as the accelerometer motion alters the length of one of the light paths. The amplified output frequency of the photodetector is compared with the excitation frequency, using a frequency ratio counter.

Because the light traverses the path to each mirror twice, displacement of a moving mirror a distance of half a wavelength at right angles to the mirror plane is sufficient to effect one complete intensity fluctuation cycle at the photodetector. Thus if the peak accelerometer excursion is  $A_0$ , the total displacement of the moving mirror is  $2A_0$  and the number of fringes counted in one traverse is  $4A_0/\lambda$ . The number of fringes counted in one vibration cycle would be  $8A_0/\lambda$ . With the excitation conditions described, the average fringe frequency is  $28.5\text{ kHz}$ . However, the instantaneous fringe frequency will vary from zero at the peak displacement of the

accelerometer (when its velocity is also zero) to a maximum of  $44.7\text{ kHz}$  at its mid-position (when its velocity is also maximum).

Laser interferometry enables the double displacement of the exciting vibration to be measured to very high accuracy. However, deriving the sensitivity of an accelerometer from this involves other measurements, as well as assumptions (such as the assumption of excitation purity) whose errors are cumulative. The net error is estimated at  $\pm 0.5\%$  at a 95% confidence level. Laser calibration requires a fairly heavy investment in specialised equipment, and is therefore not well suited for calibration by the average accelerometer user.

### Environmental Conditions

The Primary Vibration Transducer Calibration System Type 9636 is designed to be operated under stable and well-defined environmental conditions. The system should be mounted in a vibration free environment such as a basement with a stable floor, which is resting directly on the ground. The shaker and interferometer require heavy foundations, and in order to keep shaker vibration from reaching the interferometer there must be a separate foundation for each.

It might be useful to consult the paper "ISA RP52.1, Recommended Environments for Standard Laboratories" for some ideas as to the recommended levels for environmental vibrational noise.

### Rack Mounting

The individual instruments in the Primary Vibration Transducer Calibration System Type 9636 are mounted in a 19 inch instrumentation rack. A master power switch at the base of the rack, controls the AC power for all instruments in the system except for Power Amplifier Type 2707 which is separately powered with three-phase 380 V or 440 V AC. The instruments are carefully installed in the rack and tested to eliminate any possible ground loops.

### Instrumentation

The Michelson Interferometer consists of a beam splitter (semi-reflecting mirror), a reference mirror and a photodetector. The laser beam is directed at the surface to be calibrated. The beam splitter is located in the laser beam's path and directs some of the light reflected from the accel-

erometer on to a photodetector. Another part of the laser light reaching the photodetector comes via the beamsplitter and the reference mirror of the interferometer, thus generating fringes at the detector.

The Sine Generator Type 1051 generates the selected calibration frequencies for the Power Amplifier Type 2707.

The Power Amplifier Type 2707 amplifies the sine signal generated by the Sine Generator Type 1051 to provide the Vibration Exciter Type 4811 with sufficient power to excite the transducers at the g-levels required for calibration.

The Reference Accelerometer Type 8305 is laser calibrated at various frequencies at the Danish Primary Laboratory of Acoustics (DPLA). The 8305 is used for checking the function of the system as well as for round-robin testing in cooperation with other primary laboratories.

The Precision Conditioning Amplifier Type 2650 is used to condition the transducer output signal before measurement with the RMS voltmeter.

The Measuring Amplifier Type 2636 amplifies the output from the Photodetector. The output signal from the 2636 is then used as an external clock signal for the ratio Counter.

The Ratio Counter WQ 1011 calculates the ratio between the frequency of the Sine Generator Type 1051 and the output of the photodetector.

The High-precision RMS Voltmeter WQ 1010 is used for the accurate measurement of output signals from the transducers and transducer amplifiers.

The Signal Analyzer Unit Type 2035 is used for checking the harmonic distortion of the accelerometer signal and for finding the minimum (J1) points during Bessel measurements. The analyzer is equipped with two 25 kHz input modules and a generator module.

The Two-channel Rack Mounted Oscilloscope WQ 1139 is used during the laser beam adjustment procedure. One channel is connected to the accelerometer signal output and the other channel is connected to the detector output. These signals need to be displayed during the laser beam adjustment procedure to obtain the best possible detector signal.



### Delivery Conditions

The system is delivered with all the electronics installed in a rack (except the analyzer) and air vibration isolators for the interferometer. The two foundations on which the shaker and interferometer are mounted are not included. Service and instruction manuals are included with all the instruments. How to use the system is described in a System Instruction Manual included with the turn-key system from Brüel & Kjær Customized Systems.

### Training and Installation

Before shipment from Denmark, a performance test is carried out on the system. The system is then installed and verified at the customer's site, after which training will commence. The total installation and training time is approximately one week. (Subject to discussion according to customers background and special wishes.)

### General Comments

The Reference Accelerometer Type 8305 is calibrated at the Danish Primary Laboratory of Acoustics. An additional calibration at another institute like PTB or NIST can be arranged with system delivery, but is not included in the standard proposal.

### Back-to-back Calibration by Substitution (System 9610)

In traditional back-to-back calibration, the device under test is mounted back-to-back with a working standard accelerometer, and the combination is mounted on a suitable vibration source. The input acceleration to each accelerometer is identical. Consequently, the ratio of their sensitivities is simply the ratio of their outputs. The accuracy obtained with the back-to-back calibration method is improved by using the substitution technique.

Two back-to-back measurements are made. Initially, the transfer function between the working standard accelerometer and the standard ref-

erence accelerometer is measured and stored. Then the transfer function between the device under test and the working standard is measured and stored.

During the two measurements, the working standard accelerometer remains fixed to the exciter head, while the standard reference accelerometer and the device under test are individually compared to it. The method of back-to-back calibration by substitution offers the following advantages:

- Cancellation of systematic errors contributed by the electronics.
- Only the standard reference accelerometer and the precision attenuator need to be recalibrated.
- Many mounting configurations are possible because the device under Test is mounted on the adaptor plate/working standard, not directly on the reference transducer.
- Simultaneous calibration over a wide frequency range by random excitation.

The accuracy of the presented FFT-calibration technique is comparable to that attained by dedicated comparison systems.

### Instrumentation

The 9610 system uses two vibration exciters. Type 4808 covers the frequency range 5 Hz to 5 kHz, and Type 4809 covers 10 Hz to 10 kHz. The vibration exciters can be supported by an optional stand mounted on a granite block on vibration isolation pads. The stand rests on shock absorbers and levellers, or wheels.

A fixture mounted on top of the Type 4808 vibration exciter houses the working standard accelerometer. The standard reference accelerometer or the device under test is mounted on top of the fixture. No fixture is used with the Type 4809 vibration exciter; the working standard is mounted directly onto the exciter table, and the standard reference or the device under test is mounted on top of the working standard.

The 9610 system includes two matched Reference Standard Calibration Sets Type 3506. One set is used as a reference. The other is used in verification measurements to

check the reference. Each calibration set consists of a Standard Reference Accelerometer Type 8305 and a Conditioning Amplifier Type 2626, which are laser calibrated as a pair.

The Signal Analyzer Type 2035 measures the autospectra of the transducer signals and the cross-spectrum between them. It then calculates the transfer function between the two signals. The analyzer also generates the random noise signal supplied to the vibration exciters.

The Precision Attenuator Type 5936 is used in the calibration system to minimize systematic error by eliminating range switching in the analyzer.

The Vibration Transducer Multiplexer Type 5923 is especially designed to interface between the transducers and other instruments.

The system includes an IBM-compatible PC and laser printer. Vibration Transducer Software WT9301 runs on the PC and controls the calibration system.

### 9610 Software

System 9610 calibration software is a user-friendly program that minimizes manual operations, automating and simplifying the transducer calibration procedure. The software includes on-screen help, plus built-in checks to prevent errors. A comprehensive database contains all relevant data for the vibration transducers. When a particular transducer is selected for calibration, the nominal sensitivity is automatically set, along with the frequency range and tolerance limits for the calibration measurement. The software then selects either accelerometer charge, voltage, or velocity pick-up calibration. The user is prompted to configure the system properly, and to set the correct control values on the conditioning amplifiers.

The software also features a calibration database, which contains a history of calibrations for each transducer, including relevant data for the two matched Reference Standard Calibration Sets Type 3506.

# Brüel & Kjær

### WORLD HEADQUARTERS:

DK-2850 Naerum · Denmark · Telephone: +45 45 80 05 00 · Fax: +45 45 80 14 05 · Internet: <http://www.bk.dk> · e-mail: [info@bk.dk](mailto:info@bk.dk)  
Australia (02) 9450-2066 · Austria 00 43-1-865 74 00 · Belgium 016/44 92 25 · Brazil (011) 246-8166 · Canada: (514) 695-8225 · China 10 6841 9625 / 10 6843 7426  
Czech Republic 02-67 021100 · Finland 90-229 3021 · France (01) 69 90 69 00 · Germany 0610 3/908-5 · Holland (0)30 6039994 · Hong Kong 254 8 7486  
Hungary (1) 215 83 05 · Italy (02) 57 60 4141 · Japan 03-3779-8671 · Republic of Korea (02) 3473-0605 · Norway 66 90 4410 · Poland (0-22) 40 93 92 · Portugal (1) 47114 53  
Singapore (65) 275-8816 · Slovak Republic 07-37 6181 · Spain (91) 36810 00 · Sweden (08) 71127 30 · Switzerland 01/94 0 09 09 · Taiwan (02) 713 9303  
United Kingdom and Ireland (0181) 954-236 6 · USA 1 - 800 - 332 - 2040  
Local representatives and service organisations worldwide

RI10195-11

# Product Information

## Danish Primary Laboratory of Acoustics Primary Accredited Calibration of Vibration Transducers

### USES:

- Calibration of vibration transducers to international standards

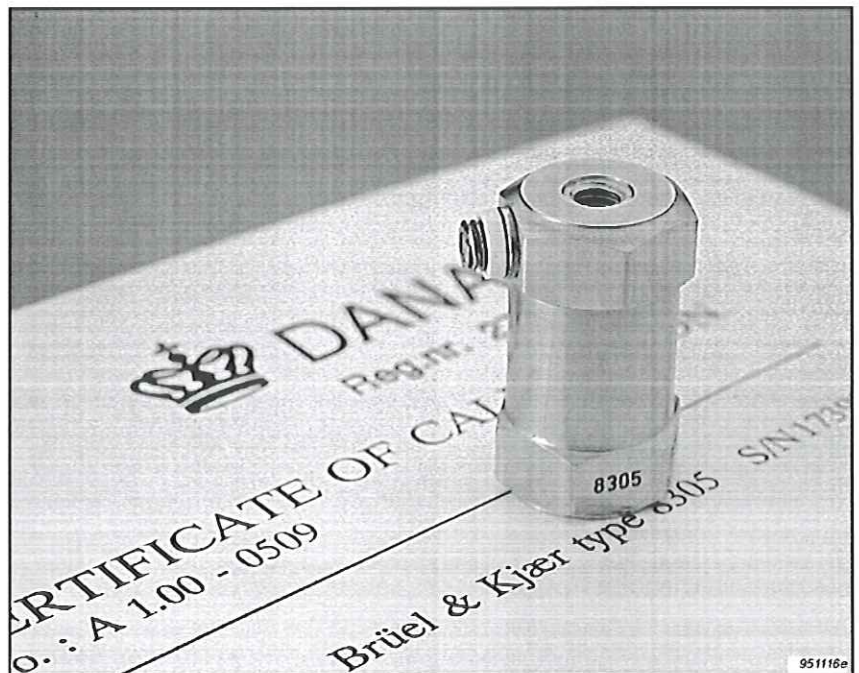
### FEATURES:

- Fulfils ISO 9000 requirements
- Calibration according to ISO 5347

- Calibrations are traceable to National Institute of Standards and Technology (NIST), USA and Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
- Certificate of calibration specifying all test and instrument details
- All test procedures fully comply with European Norm EN 45001

The Danish Primary Laboratory of Acoustics (DPLA) offers primary accredited calibration of vibration transducers which serve as Reference Standards and Working Standards for measurement laboratories and other users within the field of vibration.

Absolute calibration that have been made at the DPLA are compared with standards from leading primary laboratories all over the world. This is to ensure present, and improve future agreement between calibrations from different laboratories.



### Introduction

The Danish Primary Laboratory of Acoustics is active in research on calibration of accelerometers at the highest international level. The laboratory has taken part in several international calibration projects (under BCR, EUROMET and IEC), and members of our staff have

chaired many of the standardization working groups within IEC and ISO.

### Calibration of Reference Standard Accelerometers

The calibration of Reference Accelerometers, and Preamplifiers if includ-

ed, is performed using a laser interferometric method to determine the peak-to-peak displacement of a sinusoidal motion generated by an exciter.

This method is internationally recognized and standardized in ISO5347-1. The interferometer is a Michelson type, and the laser is a low-power HeNe laser.

# Specifications ET

DPLA Capabilities			
Measured Quantity/ Measured Unit	Measured Range	Measurement Capability	Method Used
Vibration Sensitivity: $S_v^*$ ( $V/m/s^2$ )	$\geq 4 \times 10^{-6} V/(m/s^2)$ , 20 Hz to 5 kHz	$5 \times 10^{-3} \times S_v$	ISO 5347 Laser Interferometry HeNe Laser
Vibration Sensitivity: $S_v^*$ ( $V/m/s^{-1}$ )	$\geq 4 \times 10^{-3} V/(m/s)$ , 20 Hz to 5 kHz	$5 \times 10^{-3} \times S_v$	
Vibration Sensitivity: $S_v^*$ ( $V/m$ )	$\geq 4 V/m$ , 20 Hz to 5 kHz	$5 \times 10^{-3} \times S_v$	
Vibration Sensitivity: $S_c^\dagger$ ( $C/m/s^2$ )	$\geq 1 \times 10^{-15} C/(m/s^2)$ , 50 Hz to 5 kHz	$5 \times 10^{-3} \times S_c$	
Vibration Sensitivity: $S_c^\dagger$ ( $C/m/s^{-1}$ )	$\geq 1 \times 10^{-12} C/(m/s^1)$ , 50 Hz to 5 kHz	$5 \times 10^{-3} \times S_c$	
Vibration Sensitivity: $S_c^\dagger$ ( $C/m$ )	$\geq 1 \times 10^{-9} C/m$ , 50 Hz to 5 kHz	$5 \times 10^{-3} \times S_c$	

\* Voltage Output  
† Charge Output.

Most calibrations are performed at the preferred reference frequency 159.2 Hz and at 50 m/s<sup>2</sup>, but other frequencies and levels within the accreditation range can be used if requested.

Practically all types of vibration transducers (weight <500 g) can be calibrated if they have either a charge output (piezoelectric types) or a voltage output (transducers with built-in or separate preamplifiers or with direct voltage output).

The indicated numbers and prices are valid for the Brüel & Kjær types mentioned, and similar types of transducers. For calibrations of other types of transducers individual offers will be given.

## Ordering Information

Accelerometer Calibration	Instruments	Frequency/Level
ET 2000	Calibration Set 3506. Six gain settings and accelerometer charge sensitivity are calibrated. Includes instrument check	159.2 Hz/50 m/s <sup>2</sup>
ET 2001	Standard Reference Accelerometer Type 8305. Includes accelerometer check	159.2 Hz/50 m/s <sup>2</sup>
ET 2002	Calibration Set 3506 or similar. Six gain settings and accelerometer charge sensitivity are calibrated. Includes instrument check	Customer Defined
ET 2003	Standard Reference Accelerometer Type 8305 or similar. Includes accelerometer check	Customer Defined
ET 2004	Pre-calibration of Type 8305 or 3506	159.2 Hz/50 m/s <sup>2</sup>
ET 2005	Additional calibration point for ET 2002, ET 2003, ET 2009 or ET 2010	Customer Defined
ET 2007	Calibration Set 3506. Six gain settings and accelerometer charge sensitivity are calibrated. No instrument check	159.2 Hz/50 m/s <sup>2</sup>
ET 2008	Standard Reference Accelerometer Type 8305 or 3506 in only one gain position. No instrument check	159.2 Hz/50 m/s <sup>2</sup>
ET 2009	Calibration Set 3506 or similar. Six gain settings and accelerometer charge sensitivity are calibrated. No instrument check	Customer Defined
ET 2010	Standard Reference Accelerometer Type 8305 or similar. No accelerometer check	Customer Defined

Brüel&Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice

**Brüel & Kjær** 

WORLD HEADQUARTERS:

DK-2850 Naerum · Denmark · Telephone: +45 45 80 05 00 · Fax: +45 45 80 14 05 · Internet: <http://www.bk.dk> · e-mail: [info@bk.dk](mailto:info@bk.dk)  
 Australia (02) 9450-2066 · Austria 00 43-1-865 74 00 · Belgium 016/44 92 25 · Brazil (011) 246-8166 · Canada: (514) 695-8225 · China 10 6841 9625 / 10 6843 7426  
 Czech Republic 02-67 021100 · Finland 90-229 3021 · France (01) 69 90 69 00 · Germany 0610 3908-5 · Holland (0)30 6039994 · Hong Kong 254 8 7486  
 Hungary (1) 215 83 05 · Italy (02) 57 60 4141 · Japan 03-3779-8871 · Republic of Korea (02) 3473-0605 · Norway 66 90 4410 · Poland (0-22) 40 93 92 · Portugal (1) 47114 53  
 Singapore (65) 275-8816 · Slovak Republic 07-37 6181 · Spain (91) 36810 00 · Sweden (08) 71127 30 · Switzerland 01/94 0 09 09 · Taiwan (02) 713 9303  
 United Kingdom and Ireland (0181) 954-236 6 · USA 1 - 800 - 332 - 2040  
 Local representatives and service organisations worldwide

RII0200-11

# Transfer Standard Accelerometer

**ENDEVCO  
MODEL  
2270M8**

## Model 2270M8

- Transfer Standard Accelerometer for Calibration of Back-to-Back Working Standards and Reference Standards Built into Shakers
- Stable P-10 Crystal Material
- High (55 kHz) Resonance Frequency
- Electrical Isolation
- Supplied with Reciprocity Calibration at 100 Hz  
Traceable to the NIST

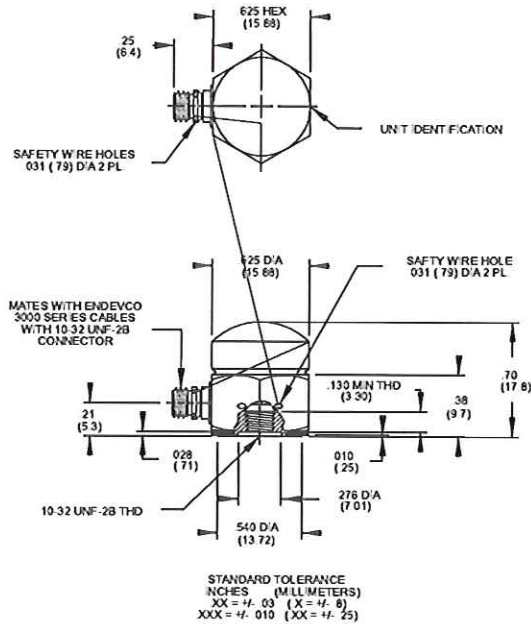


Actual size

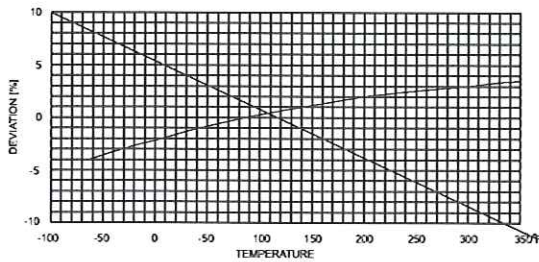
### DESCRIPTION

The ENDEVCO® Model 2270M8 Transfer Standard Accelerometer is designed for the calibration of back-to-back working standards used in comparison calibrations. It is used extensively in calibrating standard accelerometers built into the armatures of vibration exciters, such as the ENDEVCO Model 2901, or comparison standard accelerometers, such as the ENDEVCO Model 2270. The Model 2270M8 is particularly valuable as a calibration source when the working standard is to be used at frequencies up to 20 000 Hz.

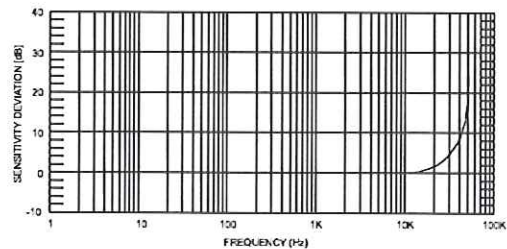
The Model 2270M8 is supplied with an absolute reciprocity calibration at 100 Hz. In addition, a comparison calibration from 20 Hz to 10 000 Hz, including a graph of sensitivity versus frequency, is supplied with all results given in a comprehensive report showing traceability to the NIST. Optional calibrations to extend the frequency response down to 2 Hz or up to 20 000 Hz are also available.



TYPICAL TEMPERATURE RESPONSE



TYPICAL FREQUENCY RESPONSE



**ENDEVCO  
MODEL  
2270M8**

# Transfer Standard Accelerometer

## SPECIFICATIONS

All specifications are typical at 75°F (24°C), referenced at 100 Hz and conform to ISA-RP 37.2 (1-64) unless otherwise indicated.

### DYNAMIC CHARACTERISTICS

CHARGE SENSITIVITY	2.2 pC/g ±25% (0.22 pC/ms <sup>2</sup> )						
CHARGE FREQUENCY RESPONSE (1)							
Frequency	2 Hz	100 Hz	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz
Deviation	0%	REF	0%	0%	+2%	+5%	+20%
MOUNTED RESONANCE FREQUENCY	55 kHz typical, with a case resonance of ~3 dB at ~35 kHz						
TRANSVERSE SENSITIVITY	3% maximum in any direction with 1% available on special order						
AMPLITUDE LINEARITY	Sensitivity increases approximately 0.1% per 1000 g, 0 to 15 000 g						
TEMPERATURE RESPONSE	±4% typical -65°F to 350°F (-54°C to 177°C) referenced to room temperature						

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

CAPACITANCE	1600 pF ±20%
RESISTANCE	20 GΩ minimum at 75°F (24°C) 100 MΩ minimum at 350°F (177°C)
ISOLATION	10 MΩ minimum between signal ground and housing
POLARITY	Positive output for acceleration into the base

### ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

TEMPERATURE RANGE	-65°F to 350°F (-54°C to 177°C)
HUMIDITY	Hermetically sealed by welding and by glass/metal seal in receptacle
ACCELERATION LIMIT	15 000 g peak shock 1000 g peak sinusoidal in any direction
BASE STRAIN SENSITIVITY	.004 equivalent g peak per μ strain peak
ELECTROMAGNETIC SENSITIVITY	0.06 equivalent g rms at 100 gauss rms, 60 Hz

### PHYSICAL CHARACTERISTICS

WEIGHT	See Outline Drawing 0.6 oz (16.5 gm) typical
CASE MATERIAL	Stainless Steel
SENSOR	ENDEVCO PIEZITE type P-10 in the single-ended compression mode
OUTPUT RECEPTACLE	10-32 UNF threaded coax socket type side connector mates with ENDEVCO Model 3090C cable assembly
MOUNTING	Detachable 10-32 stud 18 lbf-in (2 Nm) mounting torque

### CALIBRATION DATA STANDARD

CS120 Reciprocity Calibration includes an absolute reciprocity sensitivity at 100 Hz and 2 g peak, and a comparison frequency response from 20 to 10 000 Hz. Test results are furnished in a formal report that includes transverse sensitivity, resistance, capacitance, and frequency response plots.

### OPTIONAL

- CS120L Extends the frequency response calibration down to 2 Hz.
- CS120H Extends the frequency response calibration up to 20 000 kHz
- CS310 Temperature Response Calibration, -65°F to 350°F (-54°C to 177°C).
- CS110 Shock Calibration
- CS210 Sinusoidal Linearity Calibration

### ACCESSORIES

3090C-120	CABLE ASSEMBLY
2981-3	MOUNTING STUD, 10-32 UNF
15071	ADAPTER STUD, 1/4-28 UNF to 10-32 UNF

### OPTIONAL ACCESSORIES

2981-4	MOUNTING STUD, M5x0.8
--------	-----------------------

### NOTE:

1. Low frequency response will be determined by the roll-off characteristics of the charge amplifier used with the 2270M8 standard accelerometer.
2. Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax (949) 661-7231  
www.endevco.com Email: applications@endevco.com  
0501

# Comparison Standard Accelerometer

**ENDEVCO  
MODEL  
2270M15**

## Model 2270M15

- Laboratory Grade Primary Standard for Back-to-Back Comparison Calibration
- Stable ENDEVCO® P-10 Crystal Material
- Supplied with Absolute Calibration at 100 Hz Traceable to NIST
- Selectable Connection/ Isolation of Signal Ground and Case



Half size

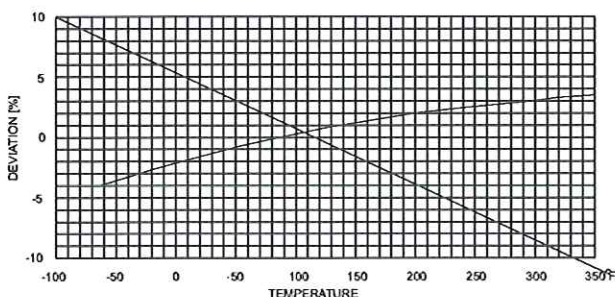
### DESCRIPTION

The ENDEVCO Model 2270M15-XX Accelerometer Standard is a combination standard accelerometer and calibration fixture used for performing vibration transducer comparison calibrations on engine vibration monitoring (EVM) and industrial type transducers. It features mounting hole patterns for direct mounting (without the use of adapter plates) of most of the ENDEVCO Model 6200 series transducers. Also available is a centrally located tapped hole for mounting test transducers via a single adapter stud. Other mounting patterns (adaptable within the physical constraints of the 2270M15) and thread sizes are available upon request. The model number suffix "-XX" designates these options. The Model 2270M15 is designed to be mounted directly on a shaker table utilizing a central 1/4-28 UNF threaded hole located on the bottom mounting surface.

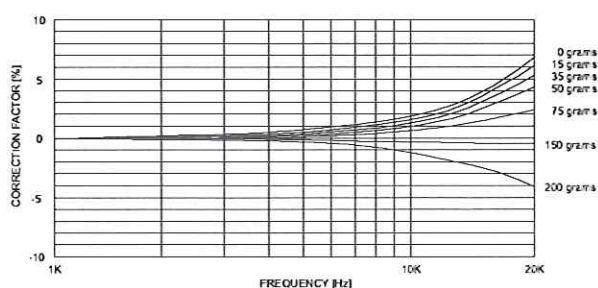
The accelerometer output is electrically isolated from the case and from the shaker mounting surface to prevent electrical ground loops. It is designed to have a high degree of mechanical strain isolation to minimize sensitivity changes in the standard accelerometer caused by poor shaker motion and the weight of test transducers.

The Model 2270M15 is supplied with an absolute reciprocity sensitivity calibration at 100 Hz. In addition, a comparison frequency response calibration is supplied from 20 Hz to 10 000 Hz. Optional calibrations are available to extend the calibration down to 2 Hz and up to 20 000 Hz. All results are given in a comprehensive report showing traceability to the NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY.

TYPICAL TEMPERATURE RESPONSE



TYPICAL FREQUENCY RESPONSE AND RELATIVE MOTION



**ENDEVCO  
MODEL  
2270M15**

# Comparison Standard Accelerometer

## SPECIFICATIONS

All specifications at 75° F (24° C), referenced at 100 Hz and conform to ISA-RP 37.2 (1-64) unless otherwise indicated.

### PERFORMANCE CHARACTERISTICS

CHARGE SENSITIVITY	2.2 pC/g ±20% (0.22 pC/ms <sup>2</sup> )
FREQUENCY RANGE	2 Hz to 20 000 Hz for accelerometers up to 200 grams
MASS LOADING EFFECT [1]	Sensitivity change due to relative motion resulting from the mass of the test accelerometer plus adaptors or fixtures ±0.2% maximum for up to 75 gm at 100 Hz ±0.5% maximum for up to 200 gm at 100 Hz ±1% typical for up to 200 gm to 5 kHz
SHOCK MOTION PULSE DURATION [2]	50 µs to 25 ms half-sine for accelerometers up to 75 gm 100 µs to 25 ms half-sine for accelerometers between 75 gm and 200 gm
TRANSVERSE SENSITIVITY	3% maximum in any direction
AMPLITUDE LINEARITY	Sensitivity increases approximately 0.1% per 1000 g, 0 to 10 000 g
TEMPERATURE RESPONSE	±3% typical, -65°F to 350°F (-54°C to 177°C) referenced to room temperature

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

CAPACITANCE	1600 pF ±20%
RESISTANCE	20 GΩ minimum, 5000 MΩ minimum at 350°F (177°C)
ISOLATION	10 MΩ minimum case to mounting stud and signal ground
POLARITY	Positive output for acceleration into the base

### ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

TEMPERATURE RANGE	-65°F to 350°F (-54°C to 177°C)
HUMIDITY	Epoxy sealed
ACCELERATION LIMIT	10 000 g peak shock, 1000 g peak sinusoidal
BASE STRAIN SENSITIVITY	0.001 equivalent g peak per µstrain peak
ELECTROMAGNETIC SENSITIVITY	0.3 equivalent g rms at 100 gauss rms, 60 Hz
STRAY VOLTAGE SENSITIVITY	0.001 equivalent g per Volt at the mounting stud

### PHYSICAL CHARACTERISTICS

DIMENSIONS	Approximately 1.4" high by 1.9" diameter (34mm x 48mm)
WEIGHT	4.1 oz. (115 gm)
CASE MATERIAL	Beryllium
SENSOR	ENDEVCO PIEZITE P-10 in the single-ended compression mode
OUTPUT RECEPTACLE [3]	10-32 UNF threaded coax socket type side connector with grounding nut. Mates with ENDEVCO Model 3090C Cable Assembly
MOUNTING [4]	1/4-28 UNF thread x 1/4" deep, mates with 29609-2 adapter stud 1/4-28 UNF thread x 1/2" deep for mounting test transducers

### CALIBRATION DATA STANDARD

See ENDEVCO Calibration Service Bulletin

CS120	Reciprocity Calibration includes an absolute reciprocity sensitivity at 100 Hz and 2 g peak, and a comparison frequency response from 20 Hz to 10 000 Hz. Test results are furnished in a formal report that includes transverse sensitivity, resistance, capacitance, and frequency response plots.
-------	--

### OPTIONAL

CS120L	Extends the frequency response calibration down to 2 Hz.
CS120H	Extends the frequency response calibration up to 20 000 Hz

### ACCESSORIES

3090C-120	CABLE ASSEMBLY
20609-2	ADAPTER STUD, 1/4-28 UNF / 1/4-28 UNF
30057	SOCKET WRENCH, six point, 3/8"
EHM 1012	CROWFOOT WRENCH, 1-11/16" with 3/8" drive

### NOTES

- Estimated accuracy of correction factor from curves showing typical response is ±1%. Sensitivity is the standard output divided by the acceleration motion at the surface provided for attaching test accelerometers. Sensitivity is the standard output divided by the acceleration motion at the mounting surface on the standard provided for attaching test transducers.
- For shock calibrations with 100 µs duration pulses, the resonance frequency of the test transducers should be above 50 kHz. If unit is to be used for shock calibration with the Endevco Model 2965C, consult factory for special anvils.
- The grounding nut should be in contact with the accelerometer housing when case isolated test transducers are being calibrated. The grounding nut should be disengaged from the accelerometer housing when case grounded test transducers are being calibrated. Tighten the grounding nut to the case just beyond finger tight with the supplied wrench (typically 6 lbf-in. (0.7 N-m)). Excessive torque may damage the case isolated receptacle assembly. This can occur during grounding or ungrounding of the grounding nut.
- Recommended torque for attachment to vibration exciter is 24 lbf-in (2.7 N-m) with 1/4-28 UNF threaded hardware. Torque values above 24 lbf-in (2.7 N-m) may damage the integral case isolated bushing assembly.
- Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax (949) 661-7231  
www.endevco.com Email: applications@endevco.com  
0501

# Comparison Standard Accelerometer

**ENDEVCO  
MODEL  
2270**

## Model 2270

- Laboratory Grade Primary Standard Accelerometer for Back-to-Back Comparison Calibration
- Stable P-10 Crystal Material
- Supplied with Absolute Calibration at 100 Hz Traceable to NIST
- Selectable Connection/ Isolation of Signal Ground and Case

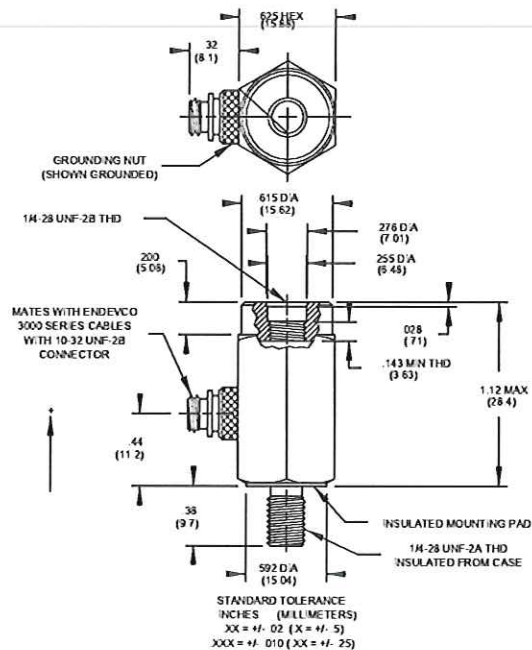


Actual size

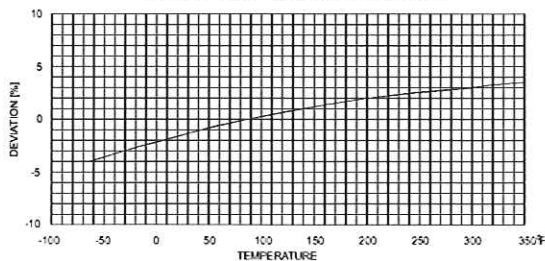
### DESCRIPTION

The ENDEVCO® Model 2270 Primary Comparison Calibration Standard Accelerometer is a combination standard accelerometer and calibration fixture used for performing comparison calibrations of other accelerometers. The extremely high stability and very flat frequency response of the accelerometer is achieved through the use of sensing elements made of ENDEVCO P-10 crystal material. The Model 2270 has a 1/4-28 tapped hole 0.5 inches deep for attaching units under test. Accessory bushings are provided to mount accelerometers that use 2-56, 6-32, or 10-32 sizes. Additional adapters with 4-40, 4-48, 8-32, and metric M3x0.5 threads are available.

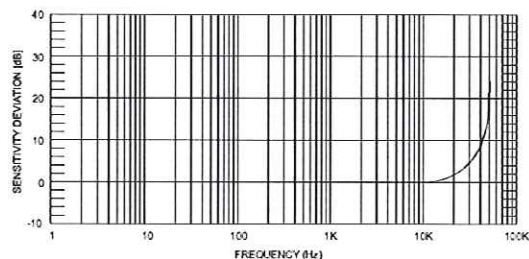
Signal ground can be switched from grounded to isolated at the user's option by means of a knurled nut on the output signal receptacle.



TYPICAL TEMPERATURE RESPONSE



TYPICAL FREQUENCY RESPONSE





**ENDEVCO  
MODEL  
2270**

# Comparison Standard Accelerometer

## SPECIFICATIONS

All specifications are typical at 75°F (24°C), referenced at 100 Hz and conform to ISA-RP 37.2 (1-64) unless otherwise indicated.

### DYNAMIC CHARACTERISTICS

CHARGE SENSITIVITY	2.2 pC/g $\pm 20\%$ (0.22 pC/ms <sup>2</sup> )	
FREQUENCY RANGE [1]	accelerometers up to 35 grams	2 Hz to 20 000 Hz
	accelerometers between 35 grams and 100 grams	2 Hz to 5000 Hz
MASS LOADING EFFECT [2]	Sensitivity change due to relative motion resulting from the mass of the test accelerometer plus adapters or fixtures	
	$\pm 0.2\%$ maximum for up to 100 gm at 100 Hz	
	-2% for 50 gm at 10 kHz or 100 gm at 5 kHz	
SHOCK MOTION PULSE DURATION [3]	100 $\mu$ s to 25 ms half size for accelerometers up to 35gm	
	200 $\mu$ s to 25 ms half-size for accelerometers between 35gm and 100gm	
TRANSVERSE SENSITIVITY	3% maximum in any direction, 1% available on special order	
AMPLITUDE LINEARITY	Sensitivity increases approximately 0.1% per 1000 g, 0 to 15 000 g	
TEMPERATURE RESPONSE	$\pm 3\%$ typical -65°F to 350°F (-54°C to 177°C) referenced to room temperature	
CHARGE SENSITIVITY TIME STABILITY	$\pm 0.2\%$ maximum per year	

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

CAPACITANCE	1600 pF $\pm 20\%$
RESISTANCE	20 G $\Omega$ minimum 5000 M $\Omega$ minimum at 350°F (177°C)
ISOLATION	10 M $\Omega$ minimum case to mounting stud and signal ground
POLARITY	Positive output for acceleration into the base

### ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

TEMPERATURE RANGE	-65°F to 350°F (-54°C to 177°C)
HUMIDITY	Epoxy Sealed
ACCELERATION LIMIT	15 000 g peak shock, 1000 g peak sinusoidal
BASE STRAIN SENSITIVITY	0.001 equivalent g peak per $\mu$ strain peak
ELECTROMAGNETIC SENSITIVITY	0.03 equivalent g rms at 100 gauss rms, 60 Hz
STRAY VOLTAGE SENSITIVITY	0.003 equivalent g per Volt at the mounting stud

### PHYSICAL CHARACTERISTICS

WEIGHT	1.4 oz. (40 gm)
CASE MATERIAL	17-4 PH Stainless Steel
SENSOR	ENDEVCO PIEZITE type P-10 in the single-ended compression mode
OUTPUT RECEPTACLE [4]	10-32 UNF threaded coax socket type side connector with grounding nut. Mates with ENDEVCO Model 3090C Cable Assembly
MOUNTING [5]	Integral mounting stud 1/4-28 UNF thd x 3/8" long 1/4-28 UNF thd x 1/2" deep for mounting test transducers

### CALIBRATION DATA STANDARD

See ENDEVCO Calibration Service Bulletin

**CS120** Reciprocity Calibration includes an absolute reciprocity sensitivity at 100 Hz and 2 g peak, and a comparison frequency response from 20 to 10 000 Hz. Test results are furnished in a formal report that includes transverse sensitivity, resistance, capacitance, and frequency response plots.

### OPTIONAL

<b>CS120L</b>	Extends the frequency response calibration down to 2 Hz.
<b>CS120H</b>	Extends the frequency response calibration up to 20 000 kHz
<b>CS310</b>	Temperature Response Calibration, -65°F to 350°F (-54°C to 177°C).

### ACCESSORIES

<b>3090C-120</b>	CABLE ASSEMBLY
<b>15071</b>	ADAPTER STUD, 1/4-28 UNF to 10-32 UNF
<b>14159-1</b>	ADAPTER BUSHING, 10-32 UNF
<b>14159-2</b>	ADAPTER BUSHING, 6-32 UNC
<b>14159-4</b>	ADAPTER BUSHING, 2-56 UNC

### OPTIONAL ACCESSORIES

<b>14159-3</b>	ADAPTER BUSHING, 4-40 UNC
<b>14159-5</b>	ADAPTER BUSHING, 4-48 UNF
<b>14159-6</b>	ADAPTER BUSHING, 8-32 UNC
<b>14159-7</b>	ADAPTER BUSHING, M3x0.5

### NOTES:

1. Low frequency response will be determined by the characteristics of the charge amplifier used with the 2270 standard accelerometer.

- Estimated accuracy of correction factor curves showing typical response is  $\pm 1\%$ . Sensitivity is the standard output divided by the acceleration motion at the surface provided for attaching test accelerometers.
- For calibrations with 100  $\mu$ s duration pulses, the resonance frequency of the test accelerometer should be above 50 kHz.
- Tighten the grounding nut to the case finger tight - approximately 4 lbf - in (0.7 Nm). Excessive torque could damage the isolated receptacle assembly. The grounding nut should be in contact with the accelerometer housing when case isolated test transducers are being calibrated, and should be disengaged from the accelerometer housing when case grounded test transducers are being calibrated.
- Recommended torque for attachment is 18 lbf - in (2Nm). Torque values above 24 lbf - in could cause permanent damage to the isolated bushing assembly.
- Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax (949) 661-7231  
www.endevco.com Email: applications@endevco.com

0501

# Product Data

## Vibration Transducer Calibration System — Type 9610

### USES:

- Fast and accurate amplitude and phase calibration of accelerometers and velocity pick-ups
- Charge and voltage calibration of accelerometers, from 5 Hz to 10 kHz
- Voltage calibration of velocity pick-ups, from 5 Hz to 2 kHz
- Charge sensitivity calibration of accelerometers, from 0.002 to 500 pC/ms<sup>-2</sup> (0.02 to 5000 pC/g)
- Voltage sensitivity calibration of accelerometers (with and without built-in electronics), from 0.1 to 1000 mV/ms<sup>-2</sup> (1 to 10 000 mV/g)

- Voltage sensitivity calibration of velocity pick-ups, from 0.4 to 99 mV/mms<sup>-1</sup> (10 to 2500 mV/in/s)

### FEATURES:

- Typical calibration accuracy 5 to 10 Hz: 1.3%, 10 Hz to 4 kHz: 1.2%, 4 to 7 kHz: 1.8%, 7 to 10 kHz: 2.6%
- PC-based software control and complete database
- Graphical report of calibration results using linear or logarithmic frequency and amplitude scales
- Selection between SI or imperial units (g, in, in/s)
- Typical calibration time of 3 to 10 minutes

### Introduction

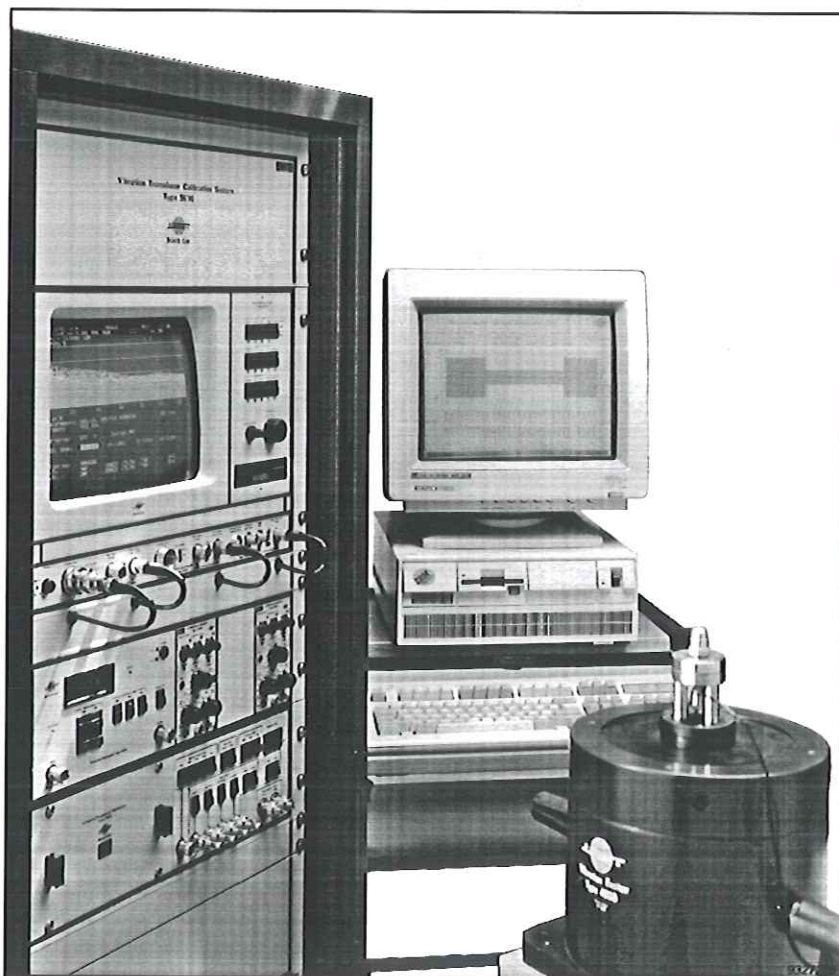
The Vibration Transducer Calibration System Type 9610 is an easy-to-use PC-based system which, after a few preliminary manual control settings, enables automatic calibration of a wide range of accelerometers and velocity pick-ups.

### Back-to-back Calibration by Substitution

In traditional back-to-back calibration, the Device Under Test is mounted back-to-back with a Working Standard Accelerometer, and the combination is mounted on a suitable vibration source (see Fig. 3). The input acceleration to each accelerometer is identical. Consequently, the ratio of their sensitivities is simply the ratio of their outputs.

The accuracy obtained with the back-to-back calibration method is improved by using the substitution technique, which is illustrated in Fig. 1.

Calibration by substitution involves making two back-to-back measurements. Initially, the transfer function between the Working Standard Accelerometer and the Standard Reference Accelerometer is measured and stored. Then the transfer function between the Device Under Test and the Working Standard is measured and stored.



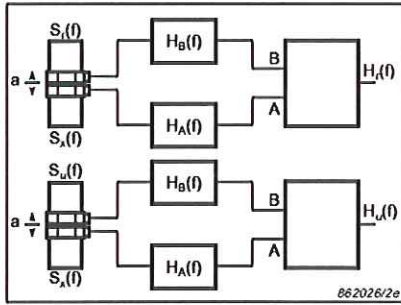


Fig.1 The principle of back-to-back calibration by substitution

During the two measurements, the Working Standard Accelerometer remains fixed to the exciter head, while the Standard Reference Accelerometer and the Device Under Test are individually compared to it. The charge sensitivity of the Device Under Test is then calculated as follows:

$$\frac{S_u(f)}{S_x(f)} * \frac{S_x(f)}{S_r(f)} = \frac{H_u(f)}{H_r(f)}, \text{ or}$$

$$S_u(f) = S_r(f) * \frac{H_u(f)}{H_r(f)}, \text{ where:}$$

- $S_u(f)$ ,  $S_r(f)$  and  $S_x(f)$  are the charge sensitivities of the Device Under Test, the Standard Reference Accelerometer and the Working Standard Accelerometer.
- $H_u(f)$  is the transfer function between the Device Under Test and the Working Standard Accelerometer.
- $H_r(f)$  is the transfer function between the Standard Reference Accelerometer and the Working Standard Accelerometer.

The ratio  $H_u(f)/H_r(f)$  is given by the equalized frequency response function. This is a post-processing function of the analyzer, which calculates the complex ratio between the measured and stored data.

The method of back-to-back calibration by substitution offers the following advantages:

- Cancellation of systematic errors contributed by the electronics.
- Only the Standard Reference Accelerometer and the precision attenuator need to be recalibrated.
- Many mounting configurations are possible because the Device Under Test is mounted on the adaptor plate/Working Standard, not directly on the reference transducer.
- Simultaneous calibration over a wide frequency range by random excitation.

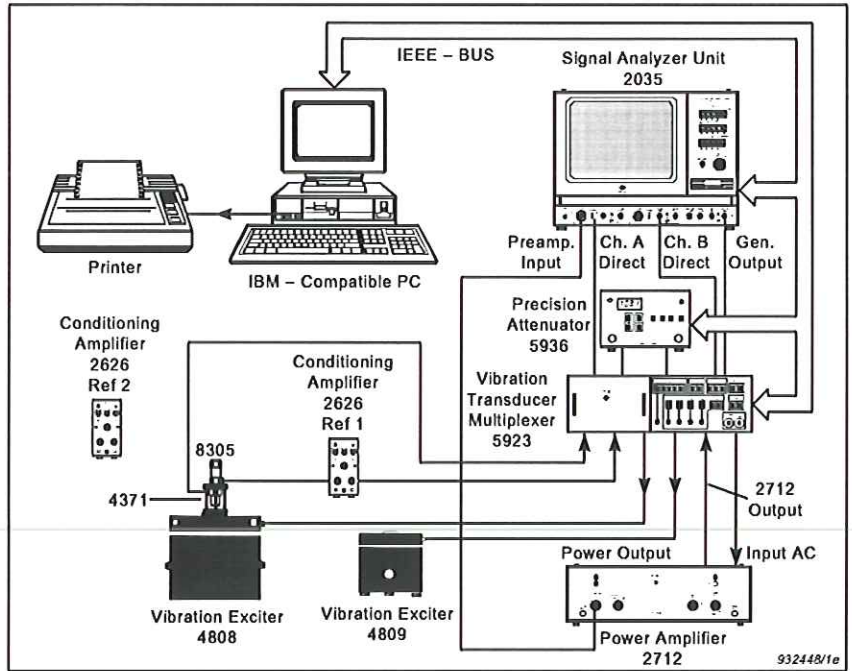


Fig.2 Vibration Transducer Calibration System Type 9610

The accuracy of the presented FFT-calibration technique is comparable to that attained by dedicated comparison systems.

#### Instrumentation

The configuration of the Vibration Transducer Calibration System Type 9610 is shown in Fig.2. The system uses two vibration exciters. Type 4808 covers the frequency range 5 Hz to 5 kHz, and Type 4809 covers 10 Hz to 10 kHz. The vibration exciters can be supported by an optional stand mounted on a granite block on vibration isolation pads. The stand rests on shock absorbers and levellers, or wheels.

A fixture mounted on top of the Type 4808 vibration exciter houses the Working Standard Accelerometer. The Standard Reference Accelerometer or the Device Under Test is mounted on top of the fixture (see Fig.3). No fixture is used with the Type 4809 vibration exciter; the Working Standard is mounted directly onto the exciter table, and the Standard Reference or the Device Under Test is mounted on top of the Working Standard.

The system includes two matched Reference Standard Calibration Sets Type 3506 (Type 9623). One set is used as a reference. The other is used in verification measurements to check the reference. Each calibration set consists of a Standard Reference

Accelerometer Type 8305 and a Conditioning Amplifier Type 2626, which are laser calibrated as a pair.

The Signal Analyzer Type 2035 measures the auto-spectra of the transducer signals and the cross-spectrum between them. It then calculates the transfer function between the two signals. The analyzer also generates the random noise signal supplied to the vibration exciters.

The Precision Attenuator Type 5936 is used in the calibration system to minimize systematic error by eliminating range switching in the analyzer.

The Vibration Transducer Multiplexer Type 5923 is especially designed to interface between the transducers and other instruments.

The system includes an IBM-compatible PC and printer. Vibration Transducer Software Type WT 9301 runs on the PC and controls the calibration system.

#### System Description

The Vibration Transducer Calibration System Type 9610 is a turn-key system which is installed by a Brüel & Kjær calibration engineer.

To ensure high calibration accuracy, special attention has been paid to system and standard verifications. The system verification involves a series of automatic measurements to check that the system is warmed up

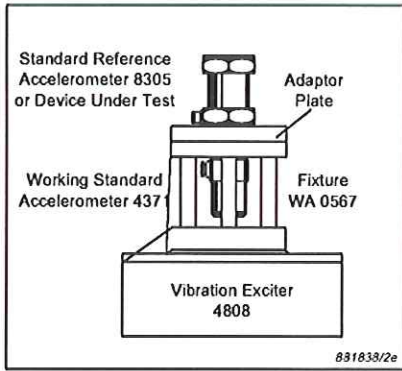


Fig.3 The fixture and transducers mounted on the vibration exciter

and producing stable measurement results.

The standard verification ensures that the Standard Reference Accelerometers Type 8305 and Calibration Sets Type 3506, which are used as charge and voltage standards, are within the tolerance for valid calibration measurements. The calibration system must pass the verification tests before a valid calibration can be performed.

### The Software

The calibration software is a user-friendly program that minimizes manual operations, making transducer calibration an automated and simple procedure. The software includes on-screen help, plus built-in checks to prevent errors. For example, highlighted fields indicate whether the following checks have been performed:

- System Warm-up
- System Verification,
- Voltage Verification
- Charge Verification

When the system is switched on, each field is highlighted in red, indicating that the functions have not been performed. After a 30 minute warm-up period, the first field turns green. The other fields also change to green when the associated verification has been made.

A valid measurement can be made only when all of the indicators are green, although it is possible to override the system checks and proceed with measurements immediately. However, when this is done, all resulting data is automatically marked to indicate that it might not be valid.

A measurement report showing the charge sensitivity response (magnitude) of an accelerometer is shown in Fig.4. The phase response for the

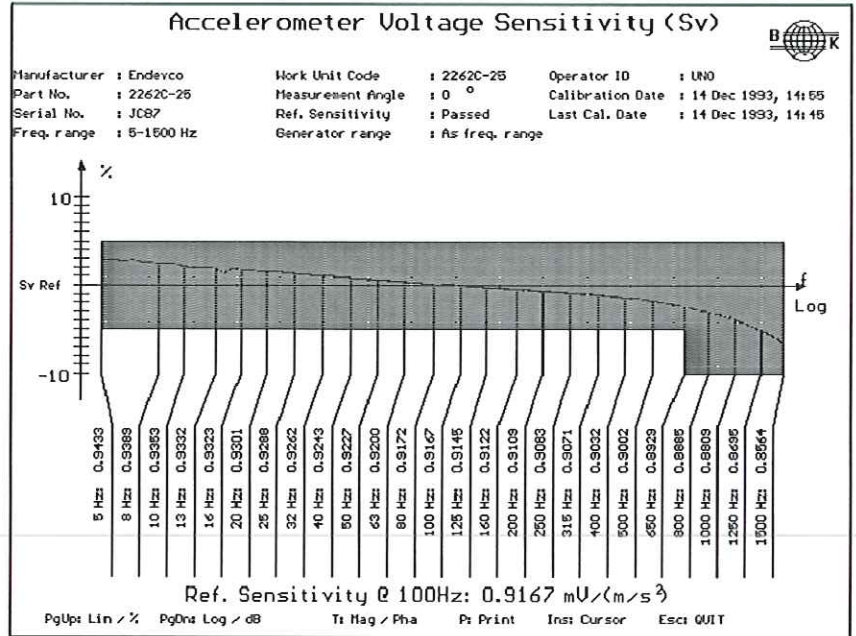


Fig.4 A measurement report produced by the system, showing the charge sensitivity magnitude response of an accelerometer

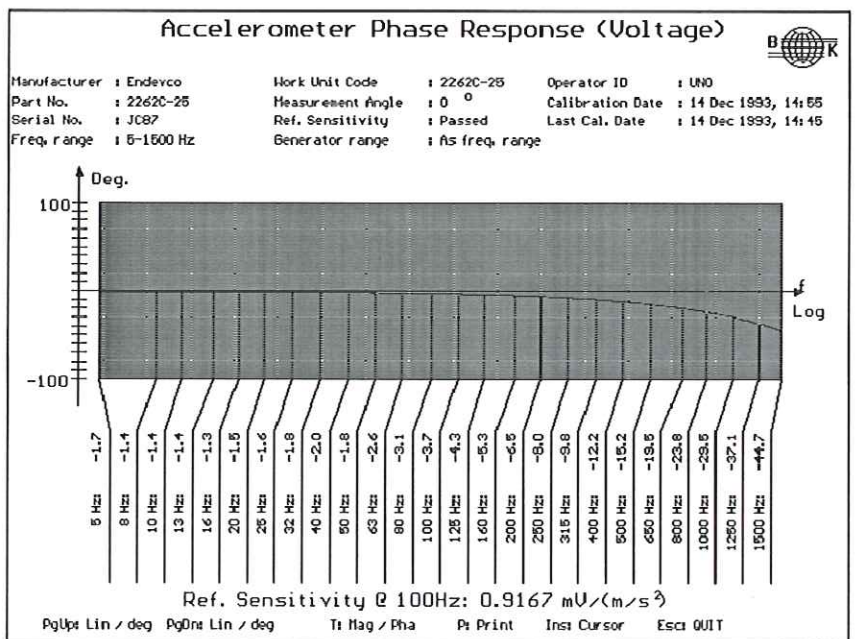


Fig.5 A measurement report produced by the system, showing the charge sensitivity phase response of an accelerometer

same accelerometer is shown in Fig.5. When displaying results, you can choose between a linear or logarithmic scale for both axes. All measurement results can be printed out.

The calibration software package includes a comprehensive database that includes all relevant data for your vibration transducers. When a

particular transducer is selected for calibration, the software automatically sets the nominal sensitivity, frequency range and tolerance limits for the calibration measurement, based on the database. It also selects either accelerometer charge, voltage, or velocity pick-up calibration. You are then prompted to select the correct

calibration standard, and to set the correct control values on the conditioning amplifiers.

The software includes a "product information" database (see Fig. 6), which contains all relevant data for calibrating each transducer. The data is saved with the calibration results for subsequent print-out.

The software also features a calibration database, which contains a history of calibrations for each transducer. The 3506 database contains all the relevant data for the two matched Reference Standard Calibration Sets Type 3506 (Type 9623).

Brüel & Kjær	Accelerometer	Product Information	14 Dec 1993, 14:59
Manufacturer: Endeveco		Operator ID : UNO	
Part number : 2262C-25		Work unit code : 2262C-25	
		Measurement angle: 0°	
Charge sensitivity : ( 0.001 + 0.000 - 0.000) pC/(m/s <sup>2</sup> ) @ 160 Hz			
Voltage sensitivity : ( 1.020 + 0.102 - 0.204) mV/(m/s <sup>2</sup> ) @ 100 Hz			
Parameter to test : Voltage		Internal electronics: None	
Frequency band	Permissible deviation	Graphics scaling	
5 - 650 Hz	+ 5.0 % - 5.0 %	X axis : Log	
650 - 1500 Hz	+ 5.0 % -10.0 %	Y axis : %	
0 - 0 Hz	+ 0.0 % - 0.0 %	Y max : 10 %	
Coupling diam.: 13.7 mm.	Capacitance : 0.0 pF		
Adapter plate : WS3104	Mount res freq: 2500 Hz	Xducer weight: 28.00 g	
Mounting screw: 12 mm	Storage frequencies in Hz:	5 8 10 13	
		16 20 25 32 40 50 63 80 100 125 160 200 250	
		315 400 500 650 800 1000 1250 1500 0 0 0 0 0	
Comments: #SFR#Connect the 10.0 VDC to the red & black wires on the acc.			

Fig. 6 A print-out of a product information record

## Specifications 9610

<p><b>PRINCIPLE OF CALIBRATION:</b> Improved FFT Method (Calibration by Substitution)</p> <p><b>INPUT TYPES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Charge input for piezoelectric transducers</li> <li>Voltage input with constant current supply (for example DeltaTron)</li> <li>Current input with constant voltage supply (for example Line-drive)</li> <li>Voltage input with variable loads for velocity transducers</li> <li>High impedance voltage input for piezoelectric accelerometers and other devices with voltage output (for example strain gauges)</li> </ul>	<p><b>INPUT RANGE:</b></p> <p>Charge: 0.002-500 pC/ms<sup>-2</sup> (0.02-5000 pC/g) Voltage: 0.1-1000 mV/ms<sup>-2</sup> (1-10 000 mV/g) Velocity: 0.4-99 mV/mms<sup>-1</sup> (10-2500 mV/in/s) Noise Device Under Test Channel: (charge input) 20×10<sup>-6</sup> pC/Hz<sup>0.5</sup> (frequency band 6.4 kHz) with Type 2626 at max. gain</p> <p><b>INPUT IMPEDANCE:</b></p> <p>Voltage: 300 MΩ // &lt;3 pF Velocity: 10 kΩ, 20 kΩ, 1 MΩ, 2 MΩ and 300 MΩ</p> <p><b>FREQUENCY RANGE:</b></p> <p>Accelerometers: 5 Hz-10 kHz Velocity Pick-ups: 5 Hz-2 kHz</p>	<p><b>MAX. TRANSDUCER WEIGHT:</b></p> <p>5 Hz-5 kHz: 500 g 5 Hz-10 kHz: 60 g</p> <p><b>CALIBRATION ACCURACY:</b></p> <p>Typical estimated absolute errors (including temperature and transverse sensitivity effects) for charge calibrations of transducers having sensitivities within the range 0.1-12 pC/ms<sup>-2</sup> are as follows:</p> <p>5-10 Hz: 1.3% 10 Hz-4 kHz: 1.2% 4-7 kHz: 1.8% 7-10 kHz: 2.6%</p> <p>A comprehensive error analysis is included in the user literature</p>
---	---	--

## Ordering Information

<p><b>Type 9610:</b> Vibration Transducer Calibration System Includes the following: Type 2035: Signal Analyzer Unit Type 7649: Dual-channel Analysis Software 2×Type 3019: 25 kHz Input Module Type 3156: 25 kHz Zoom Processor Type 3106: Generator &amp; Sampling Module Type 5923: Vibration Transducer Multiplexer 2×WB0693: Differential Charge Amplifier Type 5936: Precision Attenuator Type 9623: Two matched Calibration Sets Type 3506 (REF I and REF II) including laser calibration certificates from the Danish Primary Laboratory of Acoustics (DPLA): REF I: Type 2626/WH2370 Type 8305/WH2335 REF II: Type 2626 Type 8305 Type 2712: Power Amplifier</p>	<p>Type 4371/ WH2525: Working Standard Accelerometer/ Type 4371 Unit Selection Type 4808/ WH2651: Vibration Exciter/ Type 4808 Unit Selection Type 4809: Vibration Exciter WA0567: Calibration Fixture WF 0037: Rack, cables, panels, etc.—all mounted and tested in rack Type 9610X: System assembly, test, installation and training WQ 1109: IBM-compat. PC, DOS &amp; col. scr. WQ 0625: GPIB Interface WQ 1037: IBM 2380 Matrix Printer WT 9301: Vibration Transducer Software</p> <p><b>Optional Accessories:</b></p> <p>WQ 1118: Laser Printer (replaces WQ 1037) WA0506: Vibration Exciter Support Stand</p>	<p>WA0507: Granite Block for WA0506 WA0523: Carriage for WA0506</p> <p><b>PC Requirements:</b> If a PC other than the one included in the system is used, it must fulfil the following minimum requirements:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>An IBM PC or compatible with a 80386 micro-processor (≥ 33 MHz) and a coprocessor</li> <li>≥ 2 Mb RAM, ≥ 130 Mb hard disk</li> <li>MS-DOS, Version 5.0 or higher</li> <li>VGA display</li> <li>National Instruments IEEE-488 GPIB Interface</li> <li>Printer (optional): IBM Proprinter-compatible 9-pin dot matrix printer, or HP Laserjet II-compatible laser printer</li> </ul>
---	--	--

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice

# Brüel & Kjær

### WORLD HEADQUARTERS:

DK-2850 Naerum · Denmark · Telephone: +45 45 80 05 00 · Fax: +45 45 80 14 05 · Internet: <http://www.bk.dk> · e-mail: [info@bk.dk](mailto:info@bk.dk)  
Australia (02) 9450-2066 · Austria 00 43-1-865 74 00 · Belgium 016/44 92 25 · Brazil (011) 246-8166 · Canada: (514) 695-8225 · China 10 6841 9625 / 10 6843 7426  
Czech Republic 02-67 021100 · Finland 90-229 3021 · France (01) 69 90 69 00 · Germany 0610 3/908-5 · Holland (0)30 6039994 · Hong Kong 254 8 7486  
Hungary (1) 215 83 05 · Italy (02) 57 60 4141 · Japan 03-3779-8671 · Republic of Korea (02) 3473-0605 · Norway 66 90 4410 · Poland (0-22) 40 93 92 · Portugal (1) 47114 53  
Singapore (65) 275-8816 · Slovak Republic 07-37 6181 · Spain (91) 36810 00 · Sweden (08) 71127 30 · Switzerland 01/94 0 09 09 · Taiwan (02) 713 9303  
United Kingdom and Ireland (0181) 954-238 6 · USA 1 - 800 - 332 - 2040  
Local representatives and service organisations worldwide  
BP 1426-11

# Product Information

---

## Accredited Calibration Services

### USES:

- Achieve proper Quality Assurance goals
- Maintain traceable calibrations
- Guarantee reliable measurements
- Fulfil ISO 9000 requirements

### FEATURES:

- Sound Level Meters
- Analyzers
- Charge Amplifiers
- Filters
- Reference Standard Transducers at DPLA

### Calibration is an integral part of quality

For test and calibration, good engineering practice, as described in different standards, includes the following points:

- Calibration and measuring instruments must be calibrated at pre-determined intervals
- Proper control of purchased services is required
- Complete documentation is required for test procedures and specifications, test program software and instrument calibration

### Traceability

To fulfil the points above it is necessary that all calibrations are traceable and made with a well-known and documented uncertainty.

### Reliability

By combining Brüel & Kjær service and accredited calibration, we are offering the ultimate in reliability and performance for your Brüel & Kjær instruments.

Normally, calibration of instruments follows procedures given by the manufacturer, and therefore we are the first choice to calibrate Brüel & Kjær instruments. Furthermore, if repair or adjustment is needed, our Service Department is nearby, ready to take care of any problems.

Several options for planned support are available to make your life easier and maintain the highest measurement reliability. Please refer to detailed data sheets for each type of calibration or contact your local Brüel & Kjær representative.

### ISO 9000

The ISO 9000 Standards describe the requirements for quality systems in different parts of a company. The number of companies being certified as following these standards is rapidly increasing.

An ISO 9000 certification often requires accredited calibrations for instruments used to determine product data.

### Accredited Calibration

To ensure that the quality of a calibration fulfils the requirements called for in ISO and other standards, the international community has created the accreditation principle, and rules for its usage. These rules are laid down in the European Standards EN45001-2-3, which are based very much upon the ISO/IEC Guides 25 and 49.

An accreditation by an accreditation body is the only viable path to getting general acceptance of a calibration laboratory.

In Denmark, this body is the Danish Accreditation or DANAK which is controlled by the National Agency of Industry and Trade.

DANAK Accreditation is accepted by Denmark, Finland, France, Germany, Italy, The Netherlands, Norway, Sweden, Switzerland and The United Kingdom since a Multilateral Agreement between the national calibration services was signed in December 1990.

### Calibration Laboratory Accreditation

The calibration laboratory at Brüel & Kjær is accredited by DANAK to perform calibrations of a variety of instruments used for measurement and analysis of sound and vibration.

The calibrations are performed according to international standards and/or recommended procedures.

Well controlled environmental conditions and traceability to international primary laboratories is maintained.

## The Brüel & Kjær Calibration Laboratory

The Brüel & Kjær Calibration Laboratory is operated as an independent laboratory within Brüel & Kjær. The Calibration Laboratory works in close co-operation with our Service Department, offering the ultimate solution for reliability, performance and lead-time on service and calibration of your Brüel & Kjær equipment.

### Accreditation Ranges (Condensed)

Measured Quantity/ Measured Unit	Measurement Range	Measurement Capability	Working Standard	Method	Remarks
DC Voltage <i>U</i> Volt	0.1 – 10 mV	$1 \cdot 10^{-2} \cdot U + 2 \mu\text{V}$	Digital Multimeter	IEC 651 IEC 804 DIN 45657 OIML R58 OIML R88 and manufacturers recommenda- tions	
	10 mV – 1000 V	$5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 2 \mu\text{V}$			
AC Voltage <i>U</i> Volt	3 – 100 mV (1 – 45 Hz)	$9 \cdot 10^{-2} \cdot U$			
	3 – 100 mV (45 Hz – 100 kHz) & 0.1 – 100 V (1 – 45 Hz)	$2.5 \cdot 10^{-2} \cdot U$			
	0.1 – 100 V (45 Hz – 100 kHz)	$2 \cdot 10^{-3} \cdot U$			
AC Voltage Ratio decibel	-50 dB (1 – 45 Hz)	1.1 dB			
	+10 – (-40) dB (1 – 45 Hz)	0.02 dB + 0.006 dB/dB			
	+10 – (-50) dB (45 Hz – 100 kHz)	0.01 dB + 0.004 dB/dB			
Resistance <i>R</i> /ohm	1 Ω – 10 MΩ	$1 \cdot 10^{-4} \cdot R$			
Frequency <i>f</i> /hertz	1 Hz – 1 MHz	$1 \cdot 10^{-6} \cdot f + 1$ ciffer	Counter		DCF 77 synkron
Sound Pressure Level Pascal	94 dB (31.5 Hz – 8 kHz octave frequencies)	0.1 dB	Multifunction Acoustic Calibrator (B & K Type 4226)		Re $20 \cdot 10^{-6}$ Pa
	94 dB (12.5 kHz)	0.13 dB			

### Danish Primary Laboratory of Acoustics (DPLA)

DPLA is the Danish primary laboratory for accelerometer and microphone calibration. It is operated as an independent laboratory within Brüel & Kjær in cooperation with The Laboratory of Acoustics (at The Technical University of Denmark, Lyngby). When the Brüel & Kjær Calibration Laboratory needs primary accelerometer or microphone standards these are naturally obtained from DPLA. A short description of DPLA's capabilities is given below.

Measured Quantity/ Measured Unit	Measurement Range	Measurement Capability	Method Used
Vibration Sensitivity <i>S<sub>v</sub></i> V/ms <sup>-2</sup>	$\geq 4 \cdot 10^{-6}$ V/(m/s <sup>2</sup> ) (20 Hz – 5 kHz)	$5 \cdot 10^{-3} \cdot S_v$	ISO 5347 Laser Interferometry HeNe Laser
Vibration Sensitivity <i>S<sub>c</sub></i> C/ms <sup>-2</sup>	$\geq 1 \cdot 10^{-15}$ C/(m/s <sup>2</sup> ) (50 Hz – 5 kHz)	$5 \cdot 10^{-3} \cdot S_c$	

\*Voltage Output

\*\* Charge Output Transducer weight: <500grams

Measured Quantity/ Measured Unit	Measurement Range	Measurement Capability	Method Used	Remarks
Pressure sensitivity decibel (re 1 V/Pa)	-26 ± 2 dB (31.5 Hz)	± 0.06 dB	Pressure Reciprocity Technique. Following IEC 1094-2	Type LS1P (1") (e.g. B & K Type 4160)
	-26 ± 2 dB (125 Hz)	± 0.03 dB		
	-26 ± 2 dB (4 kHz)	± 0.03 dB		
	-26 ± 2 dB (10 kHz)	± 0.12 dB		
	-37 ± 3 dB (31.5 Hz)	± 0.08 dB		Type LS2aP (1/2") (e.g. B & K Type 4180)
	-37 ± 3 dB (125 Hz)	± 0.04 dB		
	-37 ± 3 dB (8 kHz)	± 0.04 dB		
	-37 ± 3 dB (25 kHz)	± 0.30 dB		

The multiplication factor used for the uncertainties is 2 (corresponding to the previously used confidence level of 95%) as required by DANAK.

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications without notice

# Brüel & Kjær

## WORLD HEADQUARTERS:

DK-2850 Naerum · Denmark · Telephone: +45 45 80 05 00 · Fax: +45 45 80 14 05 · Internet: <http://www.bk.dk> · e-mail: [info@bk.dk](mailto:info@bk.dk)  
 Australia (02) 9450-2066 · Austria 00 43-1-865 74 00 · Belgium 016/44 92 25 · Brazil (011) 246-8166 · Canada: (514) 695-8225 · China 10 6841 9625 / 10 6843 7426  
 Czech Republic 02-67 021100 · Finland 90-229 3021 · France (01) 69 90 69 00 · Germany 0810 3/908-5 · Holland (0)30 6039994 · Hong Kong 254 8 7486  
 Hungary (1) 215 83 05 · Italy (02) 57 60 4141 · Japan 03-3779-8671 · Republic of Korea (02) 3473-0605 · Norway 66 90 4410 · Poland (0-22) 40 93 92 · Portugal (1) 47114 53  
 Singapore (65) 275-8816 · Slovak Republic 07-37 6181 · Spain (91) 36810 00 · Sweden (08) 71127 30 · Switzerland 01/94 0 09 09 · Taiwan (02) 713 9303  
 United Kingdom and Ireland (0181) 954-236 6 · USA 1 - 800 - 332 - 2040  
 Local representatives and service organisations worldwide  
 BU 0187 - 11

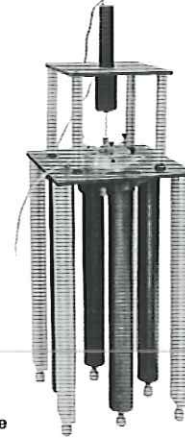
# Absolute Calibration, Laser-Shaker

**ENDEVCO  
MODEL  
2916A**

## Model 2916A

- Quadrature Michelson Interferometer for Absolute Calibration (5 Hz-50 kHz)
- 1/2" Stroke Shaker with a High Performance Beryllium Armature Allows Resonance Frequency Search to 50 KHz
- Mounting Platform Isolates Laser from Shaker and Floor Vibrations for Accurate Results
- Estimated Uncertainty
  - 0.5% 50 Hz - 5 KHz
  - 1% 5 Hz - 50 Hz, 5 kHz - 10 kHz

**Phase: 0.5° 20 Hz - 10 kHz**



Not actual size

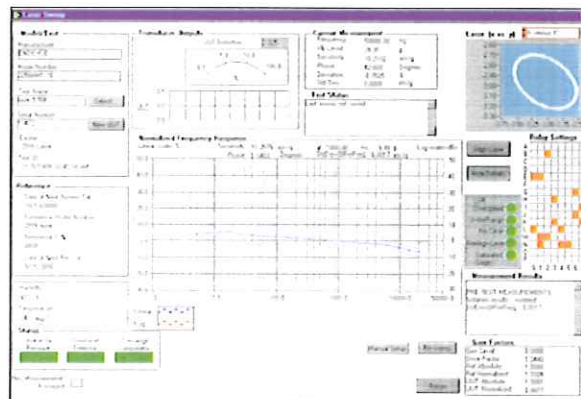
## DESCRIPTION

The ENDEVCO® Model 2916A Calibration Laser-Shaker makes it possible to perform absolute calibration of accelerometers using Method 3 of ISO 16063-11. This Model combines features of the ENDEVCO standard shaker (Model 2911), with the precision of laser absolute calibration in a compact design. The interferometer laser is mounted on a "top beaming down" configuration. The lissajous pattern of the photo detectors is used to determine proper alignment.

Absolute calibration is achieved using a polarized Helium-Neon (Classification IIIb) quadrature Michelson interferometer (laser) for frequencies from <5 Hz to 50 kHz. (The laser operates to <1 Hz, however, calibration may be limited by the signal to noise ratio of the UUT at these low acceleration levels.) The design of the self-centering, air-bearing shaker armature achieves low waveform distortion and minimal transverse motion at low frequencies. At high frequencies, the stiffness of the beryllium armature minimizes the relative motion uncertainty factor in calibration results.

Model 2916A is designed to be an integral part of the ENDEVCO Automated Accelerometer Calibration System (AACS), which is made up of the 68357 Calibration Controller and the 28978 Vibration Controller module. AACS is a complete automated system whose modular design provide flexibility and future growth options, such as the incorporation of the model 28951B Shock Calibration Module. The AACS's advanced software and signal conditioning are recommended to make maximum use of the capabilities of the Model 2916A, Absolute Calibration Laser-Shaker. Uncertainty of calibrations using the entire system is as low as <0.5% (see TP 316 for a more complete discussion of this topic) in accordance with the International Standard ISO 160063-11, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part II: Primary vibration calibration by laser interferometry."

AACS display of 2916 Absolute Calibration





**ENDEVCO  
MODEL  
2916A**

# Absolute Calibration, Laser-Shaker

## SPECIFICATIONS

All specifications at 75°F (24°C), referenced at 100Hz and conform to ISA-RP 37.2 (1-64) unless otherwise indicated.

### DYNAMIC CHARACTERISTICS

LASER	Class IIIB Helium Neon (<1mW) polarized, 632.815 nm. Beam Width: 1 mm
FREQUENCY RANGE	
Calibration	<5 to 20 000 Hz
Resonant Frequency Search	to 50 000 Hz
MASS-LOADING EFFECT (1)	Sensitivity change due to relative motion between mirror and UUT resulting from the mass of the test accelerometer plus adapters or fixtures -2% for 150 gm at 10 kHz
LASER ISOLATION SYSTEM NATURAL FREQUENCY	1.1 Hz typical

### ELECTRICAL

PHOTODETECTOR OUTPUT	.5V pk typical
PHOTODETECTOR FREQUENCY RESPONSE	3.5 MHz (-3dB)
HIGH VOLTAGE LASER SUPPLY	120 Vac, 60 Hz, fused, 0.2 amps maximum
OPTICAL DETECTOR CIRCUIT	±15V, 50 mA

### ARMATURE CHARACTERISTICS

WEIGHT	Armature Assembly 7 oz.(200 gm) typical
MATERIAL	Beryllium alloy
COIL RESISTANCE	1.5Ω
CONTINUOUS COIL CURRENT	5 A rms with cooling from air bearing
TEST TRANSDUCER MOUNTING (2)	1/4-28 UNF thread, .38 deep
ARMATURE RESONANCE	50 KHz typical

### SHAKER CHARACTERISTICS

MAGNETIC FIELD	MODEL 2911 SHAKER ASSEMBLY Permanent Magnet
CURRENT SENSITIVITY	2 lb/ampere (0.9 kgf/ampere)
ACCELERATION DISTORTION (3)	2%
TRANSVERSE MOTION (4)	5%
AIR SUPPLY	
Inlet	1/8-27 pipe thread
Nipple Supplied	1/8-27 pipe thread to 1/4" OD tube
Pressure	20 to 40 psig

### ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

TEMPERATURE	
Operating	50°F to 125°F (10°C to 52°C)
Storage	-65°F to 200°F (-54°C to 93°C)
ALTITUDE	Not affected

### PHYSICAL CHARACTERISTICS

Size	Approximately 32" high by 16" x 16" (81 cm x 41cm x 41 cm)	
Weight	Shaker Table Assembly	Approximately 300 lbs (135 kg)
	Laser Isolation Assembly	Approximately 120 lbs (54 kg)

### ACCESSORIES

15071	Adapter Stud, 1/4-28 UNF to 10-32 UNF
14159-1	ADAPTER BUSHING, 10-32 UNF
14159-2	ADAPTER BUSHING, 6-32 UNC
14159-4	ADAPTER BUSHING, 2-56 UNC

### OPTIONAL/SPARES

14159-3	ADAPTER BUSHING, 4-40 UNC
14159-5	ADAPTER BUSHING, 4-48 UNF
14159-6	ADAPTER BUSHING, 8-32 UNC
14159-7	ADAPTER BUSHING, M3X0.5
EHX268	ACOUSTIC COUPLANT

2. Recommended torque for attachment is 18 lbf - in (2 Nm). Torque values above 24 lbf - in could cause permanent damage to the mounting threads.
3. Somewhat larger harmonic distortion is present below 5 Hz and above 10 KHz at frequencies which are the 1/3 and 1/5 subharmonics of armature or accelerometer resonance frequencies.
4. Up to 10 000 Hz with a balanced load.
5. Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.

### NOTES

1. Described in TP 310, "Mass Loading in Back-to-Back Reference Accelerometers."

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax (949) 661-7231  
www.endevco.com Email:applications@endevco.com

# Portable Accelerometer Calibrator

**ENDEVCO  
MODEL  
28959F/FV**

## Model 28959F/FV

- **Portable, Rechargeable Battery**
- **Ideal for In-Situ End-to-End Calibration**
- **Calibrates/Tests Accelerometer Types:**
  - Charge Mode Piezoelectric
  - Voltage Mode Piezoelectric
  - Piezoresistive (with Option)
  - Variable Capacitance (with Option)
- **Test Range: Up to 10 g's,  
10 Hz to 10 kHz**
- **Calibration Traceable to NIST**
- **Integral Printer Provides Handy Record**
- **Internal Memory for Over 1600 Tests**
- **RS-232 Interface Transfers Field Data**
- **14-Point Calibration Report Traceable to NIST Included**



Not actual size

### DESCRIPTION

The ENDEVCO® Model 28959F/FV Portable Calibrator is designed to provide precision calibration for various types of accelerometers in the field. It is also perfect for test engineers and technicians needing on-site end-to-end calibration of their complete measurement chain.

Model 28959F/FV is a self-contained system which includes built-in vibration exciter, signal generator, computer-controlled amplifier/servo mechanism, reference accelerometer, thermal printer, RS232 serial interface, LCD display screen, signal conditioners and all necessary connectors and mounting accessories. The unit can be powered by AC line voltage or its internal rechargeable batteries. The calibrator is very powerful yet user-friendly. Operation may be learned quickly by inexperienced operators.

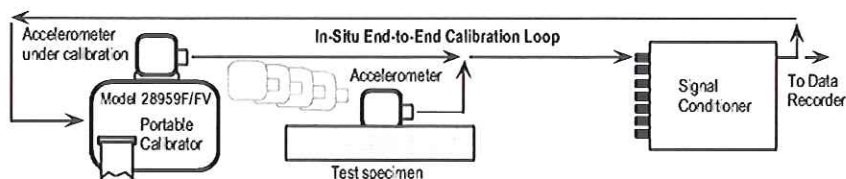
Model 28959F/FV is designed to accept charge and voltage mode piezoelectric accelerometers directly. Piezoresistive and variable capacitance type devices can also be calibrated by adding an optional external signal conditioner. Test amplitude is adjustable up to 10 g's over the frequency range of 10 Hz to 10 kHz. An internal reference accelerometer traceable to NIST serves as the comparison standard. Internal static RAM stores over 1600 test results. Sensitivity is supplied in English or metric engineering units. An automatic self-test and self-calibration feature provides measurement integrity at every power-up.

### SPECIAL FEATURES

- Displays and saves serial number and type, test parameters, date/time, and test results
- Calculates sensitivity automatically
- Hard copy record from built-in printer
- Verify accelerometer polarity
- Built-in charge convertor for charge mode devices
- Built-in constant current source for voltage mode devices (ISOTRON®, ICP type)
- Battery-powered with built-in charger
- Help screens assist operator

### END-TO-END SYSTEM CALIBRATION

The following example depicts an end-to-end calibration of one vibration measurement channel:



**ENDEVCO  
MODEL  
28959F/FV**

**Portable Accelerometer Calibrator**

**SPECIFICATIONS**

<b>DYNAMIC CHARACTERISTICS</b>	
<b>CALIBRATION</b>	Traceable to NIST (USA) standard at 2g from 20 Hz to 10 kHz
<b>MEASUREMENT UNCERTAINTY</b>	
Acceleration	10 Hz to 2 kHz, $\pm 0.3$ dB 2 kHz to 10 kHz, $\pm 1$ dB
<b>FREQUENCY RANGE</b>	
10 Hz to 10 kHz	
<b>FREQUENCY READOUT ACCURACY</b>	
0.001% $\pm 1$ count	
<b>AMPLITUDE RANGE</b>	
subject to displacement limit of 0.1 inch (2.54mm) pk-pk	
Frequency vs. Maximum Load	$\leq 100$ gm $\leq 250$ gm $\leq 500$ gm $\leq 750$ gm
10 Hz to 100 Hz	10g            4g            2g            1g
100 Hz to 1 kHz	7g            5g            2g            1g
1 kHz to 10 kHz	3g            2g            n/a           n/a
<b>REFERENCE ACCELEROMETER OUTPUT</b>	
50 mV/g, $\pm 2\%$ @ 100 Hz	
<b>REPORT FORMAT</b>	
<b>VISUAL DISPLAY</b>	4 lines of 20 characters, 5x7 dots LCD display with backlight
<b>PRINT-OUT</b>	5x7 dot matrix integral thermal printer. Paper width: 2.3"
<b>DATA STORAGE / INTERFACE</b>	
<b>INTERNAL MEMORY</b>	128K byte, store up to 1600 individual test results
<b>SERIAL INTERFACE</b>	RS-232 with a DB-9 female connector
<b>POWER REQUIREMENT</b>	
<b>POWER</b>	Battery powered with Auto Power Management. Operational during charging. Built-in charger accepts 115VAC, 50/60Hz -28959F (220VAC option available - 28959FV)
<b>PHYSICAL CHARACTERISTICS</b>	
<b>DIMENSIONS</b>	11" h x 10" w x 7" d (279 mm x 178 mm x 254 mm)
<b>WEIGHT</b>	21 lbs. (9.6 kg)
<b>ENVIRONMENTAL</b>	Operational from +10°F to +120°F (-12°C to +50°C) @ 95% RH

**ACCESSORIES**

P/N 6006-0008  
P/N 0228-0072-01  
P/N 0228-0071-01

EHM 1476  
EHM 1477  
EHM 1478  
EHM 1479  
EHM 1480  
P/N 3090CM50  
P/N 3090CM51  
P/N 2112-0007  
P/N 201-211-25C (SEIKO)

**POWER CORD**  
**SPANNER WRENCH**  
**ACCELEROMETER MOUNTING FIXTURES**  
**VARIOUS 1/4-28 MOUNTING STUD ADAPTORS**  
TO 1/4-28 UNF STUD  
TO 10-32 UNF STUD  
TO 2-56 UNC THREADED HOLE  
TO 6-32 UNC THREADED HOLE  
TO 10-32 UNF THREADED HOLE  
INPUT CABLE, VOLTAGE MODE  
INPUT CABLE, CHARGE MODE  
SPARE INPUT CONNECTOR  
PRINTER PAPER (available in many office supply sources)

**OPTIONAL ACCESSORIES**

P/N 35922  
P/N 30279  
P/N 31283  
P/N 31207  
P/N 2270M8

**BRIDGE SIGNAL CONDITIONER AND POWER SUPPLY FOR PRVC ACCELEROMETERS**  
**MOUNTING FIXTURE FOR PRVC ACCELEROMETER**  
**MOUNTING FIXTURE FOR ADHESIVE-MOUNTED ACCELEROMETERS**  
**SERIAL INTERFACE SOFTWARE FOR PC COMPATIBLE**  
**TRANSFER STANDARD ACCELEROMETER FOR CALIBRATION OF STANDARDS BUILT INTO SHAKERS**

**FACTORY RE-CALIBRATION**

CS 830

14-POINT CALIBRATION TRACEABLE TO NIST, RECOMMENDED YEARLY.

**NOTES**

Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax (949) 661-7231  
www.endevco.com Email: applications@endevco.com  
0501