

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAÍRA ROLLA CAMPOS

**DETECÇÃO DE DANOS EM VIGAS DE AÇO POR MEIO DA ANÁLISE DO
ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS**

BELO HORIZONTE
2020

MAÍRA ROLLA CAMPOS

**DETECÇÃO DE DANOS EM VIGAS DE AÇO POR MEIO DA ANÁLISE DO
ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio José Martins

BELO HORIZONTE

2020

C198d Campos, Maíra Rolla
Detecção de danos em vigas de aço por meio da análise do espectro de frequências / Maíra Rolla Campos. – 2020.
65 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientador: Cláudio José Martins.
Bibliografia: f. 59-62.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Aço – Estrutura – Teses. 2. Análise modal – Teses. 3. Pesquisa operacional – Teses. 4. Falhas estruturais – Teses. 5. Monitoramento de integridade estrutural – Teses. 6. Efeitos de vibração – Teses. I. Martins, Cláudio José. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624.182

MAÍRA ROLLA CAMPOS

**DETECÇÃO DE DANOS EM VIGAS DE AÇO POR MEIO DA ANÁLISE DO
ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. CLÁUDIO JOSÉ MARTINS – ORIENTADOR (A)

PROF. DR. LINEKER MAX GOULART COELHO (CEFET-MG)

PROF. DR. WALNORIO GRAÇA FERREIRA (UFES-ES)

Belo Horizonte, 19 de fevereiro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio por todos ensinamentos compartilhados, incentivo e apoio, fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

Aos meus amigos, em especial aos amigos da pós-graduação Fernanda, Bruno e Marília, pela convivência diária, toda ajuda e companheirismo durante esse período, tornando essa rotina mais leve e prazerosa. E ao Rodrigo por compartilhar comigo essa pesquisa, auxiliando nos ensaios e na troca de conhecimento e apoio.

À minha família querida, Mãe, André e irmãos Rayana e Ravi. Com certeza minha maior inspiração e incentivo é saber que tenho vocês do meu lado para o que der e vier.

Ao CEFET-MG e ao PPGEC, todos os professores e funcionários do departamento.

À CAPES, pelo apoio à pesquisa.

Foram dois anos difíceis e intensos em todos os sentidos. Mas com certeza me trouxeram ensinamentos e conhecimentos grandiosos!

RESUMO

As estruturas podem sofrer processos de deterioração decorrentes de diversos fatores, como falhas nos processos construtivos, utilização de materiais de baixa qualidade, ausência de manutenção adequada e degradações naturais ao longo da vida útil. A identificação destes danos é de grande importância na engenharia, pois auxilia na aplicação de medidas corretivas garantindo a segurança estrutural. Uma das formas de monitorar a integridade estrutural (SHM - Structural Health Monitoring) consiste em observar as alterações nos parâmetros modais (frequências naturais, taxas de amortecimento e modos de vibração) das estruturas ao longo do tempo. Nesse contexto, esse trabalho visa avaliar a sensibilidade das alterações nas frequências naturais, obtidas por ensaios dinâmicos simplificados em conjunto com a técnica de identificação estocástica FDD (Frequency Domain Decomposition), na identificação de danos em estruturas. Para isso, foram realizados ensaios experimentais em vigas de aço de seção I, introduzindo danos correspondentes a aproximadamente 2,25%, 8,15%, 16,3%, 21,36% e 24,25% de redução de área da seção transversal. Posteriormente, foi efetuado o processamento de sinais para determinação das frequências naturais e taxas de amortecimento. As análises realizadas demonstraram o potencial do uso de ensaios simples, rápidos e econômicos para determinação das frequências naturais e a utilização destas como indicador de danos nas estruturas.

Palavras-Chave: Análise modal operacional, Detecção de danos, Monitoramento da integridade estrutural, Decomposição do domínio da frequência

ABSTRACT

The structures can suffer deterioration processes due to several factors, such as failures in the construction processes, use of low quality materials, lack of proper maintenance and natural degradation throughout the useful life. The identification of these damages is of great importance in engineering, as it assists in the application of corrective measures ensuring structural safety. A way to monitor structural integrity (SHM - Structural Health Monitoring) is to observe changes in the modal parameters (natural frequencies, damping rates and vibration modes) of the structures over time. In this context, this work aims to assess the sensitivity of changes in natural frequencies, obtained by simplified dynamic tests in conjunction with the stochastic identification technique FDD (Frequency Domain Decomposition), in the identification of damage in structures. For this, experimental tests were carried out on steel beams of section I, introducing damages corresponding to approximately 2.25%, 8.15%, 16.3%, 21.36% and 24.25% cross section area reduction. Subsequently, signal processing was carried out to determine natural frequencies and damping rates. The analyzes performed demonstrated the potential of using simple, fast and economical tests to determine natural frequencies and the use of these as an indicator of damage to structures.

Key-words: Operation Modal analysis, Damage detection, Structural Health Monitoring, Frequency Domain Decomposition

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Função de probabilidade para variáveis aleatórias	19
Figura 2 - Etapas do processamento de sinais	19
Figura 3 - Comportamento da função de autocorrelação	22
Figura 4 - Decomposição do sinal baseado na série de Fourier	22
Figura 5 - Planejamento inicial da pesquisa	30
Figura 6 - Etapas ensaio dinâmico	32
Figura 7 – Sistema de aquisição (esquerda) e acelerômetros (direita)	32
Figura 8 - Croqui das vigas – Medidas em mm	33
Figura 9 - Posição dos cortes nas vigas.....	34
Figura 10 - Serra Mármore utilizada para realizar os cortes.	34
Figura 11 - Danos introduzidos nas vigas (a) Sem danos (b) 2,25% (c) 8,25% (d) 16,3% (e) 21,36% (f) 24,45%	35
Figura 12 - Viga sendo ensaiada.....	36
Figura 13 - Computador conectado com software para aquisição dos dados	36
Figura 14 - Rotinas executadas pelo software	37
Figura 15 - Especificações técnicas MS2005.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características geométricas e do material das vigas testadas.....	31
Tabela 2 - Comprimento das vigas.....	33
Tabela 3 - Relação da proporção dos danos nas vigas com a variação das áreas/ inércias.....	34
Tabela 4 - Frequências naturais obtidas por fórmula analítica.....	39
Tabela 5 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L1.....	40
Tabela 6 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base - Viga L1.....	40
Tabela 7 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L2.....	41
Tabela 8 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base- Viga L2.....	41
Tabela 9 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L3.....	42
Tabela 10 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base - Viga L3.....	42
Tabela 11 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L4.....	43
Tabela 12 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base - Viga L4.....	43
Tabela 13 - Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL1 p/ vibração de impacto.....	45
Tabela 14 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL1 p/ vibração de base.....	45
Tabela 15 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL2 p/ vibração de impacto.....	46
Tabela 16 - Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL2 p/ vibração de base.....	46
Tabela 17 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL3 p/ vibração de impacto.....	47
Tabela 18 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL3 p/ vibração de base.....	47
Tabela 19 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL4 p/ vibração de impacto.....	48
Tabela 20 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL4 p/ vibração de base.....	48
Tabela 21 - Vibrações de base realizadas nas vigas.....	64
Tabela 22 - Vibrações impulsivas realizadas nas vigas.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Redução das frequências naturais para Viga L1 nas diferentes posições M1,M2, M3 e M4	49
Gráfico 2 - Redução das frequências naturais para Viga L2 nas diferentes posições M1,M2, M3 e M4	50
Gráfico 3 – Redução das frequências naturais para Viga L3 nas diferentes posições M1,M2, M3 e M4	50
Gráfico 4 – Redução das frequências naturais para Viga L4 nas diferentes posições M1,M2, M3 e M4	51
Gráfico 5 – Vibração de base x Vibração de impacto para viga L1	52
Gráfico 6 - Vibração de base x Vibração de impacto para viga L2.....	52
Gráfico 7 - Vibração de base x Vibração de impacto para viga L3.....	53
Gráfico 8 - Vibração de base x Vibração de impacto para viga L4.....	53
Gráfico 9 – Redução nas frequências naturais para vibrações de base avaliando a posição do dano – L1XL2.....	54
Gráfico 10 – Redução nas frequências naturais para vibrações de impacto avaliando a posição do dano – L1XL2.....	54
Gráfico 11 - Redução nas frequências naturais para vibrações de base avaliando a posição do dano – L3XL4.....	55
Gráfico 12 - Redução nas frequências naturais para vibrações de impacto avaliando a posição do dano – L3XL4.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DFT - Transformada Discreta de Fourier (do inglês – *Discrete Fourier Transform*)

FDD – Decomposição no domínio da frequência (do inglês – *Frequency Domain Decomposition*)

FFT - Transformada rápida de Fourier (do inglês – *Fast Fourier Transformation*)

FWHM - Largura à meia altura (do inglês – *Full Width at Half Maximum*)

MEF – Método dos elementos finitos

EMA – Análise modal experimental (do inglês – *Experimental Modal Analysis*)

OMA – Análise modal operacional (do inglês – *Operation Modal Analysis*)

PSD – Densidade de energia do espectral (do inglês – *Power Spectral Density*)

SHM – Monitoramento da integridade estrutural (do inglês – *Structural Health Monitoring*)

SVD – Decomposição dos valores singulares (do inglês – *Singular Value Decomposition*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 PERGUNTA DE PESQUISA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	15
1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA	16
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REVISÃO TEÓRICA.....	18
2.1 ANÁLISE MODAL	18
2.2 PROCESSAMENTO DE SINAIS	18
2.2.1 Teorema da Amostragem	20
2.2.2 Funções de correlação.....	21
2.2.3 Transformada de Fourier	22
2.2.4 Densidade espectral	23
2.2.5 Decomposição no domínio da frequência	24
2.3 APLICAÇÃO NA ENGENHARIA DE ESTRUTURAS.....	25
3. METODOLOGIA.....	30
3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL	30
3.1.1 Obtenção dos parâmetros modais	37
4. RESULTADOS	39
4.1 Resultados para Viga L1 (3,02m)	40
4.2 Resultados para Viga L2 (3,038m)	41
4.3 Resultados para Viga L3 (1,50m)	42
4.4 Resultados para Viga L4 (1,51m)	43
5. DISCUSSÃO	44
5.1 POSIÇÃO DO ACELERÔMETRO	49
5.2 TIPO DE VIBRAÇÃO	51
5.3 LOCALIZAÇÃO DO DANO	53

5.4 SENSIBILIDADE DA TÉCNICA	55
6. CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS.....	59
ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA ACELERÔMETRO	63
ANEXO B – PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	64

1. INTRODUÇÃO

As estruturas sofrem processos de deterioração resultantes de diversos fatores como, falhas nos processos construtivos, utilização de materiais de baixa qualidade,

ausência de manutenção adequada, sobrecargas e degradações naturais ao longo da vida útil. Esses processos geram danos nas estruturas que ocasionam principalmente perdas localizadas de rigidez (BARBOSA; BORGES; CURY, 2010).

Danos são mudanças que ocorrem nas estruturas alterando adversamente seu desempenho atual ou futuro. O termo dano não necessariamente implica uma perda total da funcionalidade da estrutura, mas sim que essa não é mais operada da maneira ideal (FARRAR; KEITH, 2007).

Detectar danos em um estágio inicial é muito importante devido aos problemas existentes com manutenção e reparação de estruturas na engenharia civil. A inspeção visual é a técnica de detecção de danos mais antiga e básica. Mas assim como outras técnicas existentes, como ultrassom e métodos de raio-X, dependem de um conhecimento a priori do dano e são viáveis apenas em partes mais acessíveis da estrutura (FAN; QIAO, 2011).

Nos últimos tempos, com a evolução das ferramentas para avaliar o estado de serviço e utilização das estruturas, surgiram novos métodos para avaliação não destrutiva, como as técnicas de monitoramento da integridade estrutural (SHM - Structural Health Monitoring). Esse monitoramento consiste na detecção e caracterização de danos com intuito de garantir uma constante manutenção das estruturas. Para um bom monitoramento, é necessário observar a estrutura ao longo do tempo usando medições periodicamente espaçadas, extraindo as características necessárias para avaliar o seu estado atual (FRISWELL; PENNY, 2002).

Nesse contexto, os métodos baseados em vibrações têm recebido destaque. A vantagem desses métodos é que diferente da grande maioria das técnicas para detecção de danos que conseguem verificar apenas pequenas porções da estrutura, devido principalmente aos elevados custos para a medição de grandes áreas, os métodos baseados em vibrações permitem uma análise global do conjunto formado pela super, meso e infraestrutura e podem realizar medições em estruturas de grandes dimensões (ZHOU, 2008).

O principal desafio encontrado pelas técnicas de SHM baseadas em vibrações é como obter uma quantidade suficiente de parâmetros sensíveis a danos modais extraídos a partir da estrutura real, de modo a superar as restrições existentes devido as características da excitação, ruídos de medição, influencias ambientais como temperatura, entre outros (KOH; DYKE, 2007).

A detecção de danos baseada na medição de vibrações parte da consideração de que estruturas danificadas contêm alterações nas suas propriedades físicas, e conseqüentemente em suas respostas dinâmicas, sejam elas: frequências naturais, modos de vibração e amortecimento, sendo possível obter informações sobre a integridade da estrutura real (PANDEY; BISWAS, 1994).

Dentro dos diferentes métodos de detecção de danos, Ritter (1993) definiu uma classificação para os métodos segundo o alcance da técnica da seguinte forma: nível 1: método identifica se existe o dano; nível 2: método permite localizar dano; Nível 3: método consegue mensurar o tamanho do dano e nível 4: método prevê a avaliação de segurança da estrutura em termos de vida útil.

Para esta pesquisa, a mudança nas frequências naturais será o principal indicador usado para detectar danos (Nível 1). Estudos experimentais serão realizados para investigar a possibilidade de utilização de técnicas de detecção de danos com número reduzido de sensores para que possa ser aplicado com sucesso em estruturas de engenharia civil.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

É possível detectar pequenas alterações de danos em vigas de aço utilizando como indicador as frequências naturais, obtidas a partir da técnica Frequency Domain Decomposition (FDD)?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a sensibilidade das frequências naturais na identificação de danos devido a reduções da seção transversal de vigas de aço.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar ensaios de vibração para avaliar a influência da magnitude de danos sobre as frequências naturais de vigas de aço, verificando a sensibilidade da técnica;

- Realizar ensaios de vibração para avaliar a influência da fonte de excitação aleatória (vibrações de base e impacto de martelo) sobre as frequências naturais de vigas de aço;
- Realizar ensaios de vibração para analisar a influência da localização dos danos e posição dos acelerômetros na avaliação das frequências naturais de vigas de aço;

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Por não afetarem a performance das estruturas, os processos não-destrutivos estão sendo desenvolvidos e ganhando cada vez mais confiabilidade com os resultados alcançados, destacando-se os métodos de detecção de danos baseados em vibração. A principal vantagem é que esses métodos avaliam a estrutura de maneira global, ou seja, a aplicação de uma excitação em um determinado ponto é suficiente para analisar toda a estrutura (DOEBLING; FARRAR; PRIME, 1998).

Existem outras vantagens desses métodos baseados na análise modal, sobretudo aquela que considera como fonte de excitação da estrutura apenas as vibrações do ambiente. Entre elas estão a velocidade de análise; o baixo custo, já que os equipamentos utilizados para os ensaios de aquisição dos dados (como acelerômetros e extensômetros) são compactos e relativamente baratos; a não interrupção da operação da estrutura enquanto os testes são executados, entre outros (BAYRAKTAR *et al.*, 2010).

As medições de vibração são realizadas por diversos motivos. Para detecção de danos, para verificação da condição da estrutura sob diferentes cargas, para determinação das frequências naturais, para auxiliar na elaboração de modelos que descrevem o comportamento das estruturas, até mesmo para realizar o monitoramento da mesma perante diferentes condições ambientais e de serviço (KOH; DYKE, 2007).

Recentemente houve um aumento da atividade de pesquisa referente à detecção de danos por vibração principalmente devido aos avanços técnicos na área da análise estrutural, com o desenvolvimento de equipamentos mais sensíveis e precisos e a evolução das técnicas experimentais, facilitando assim, a medição de parâmetros modais nas estruturas (ZHOU, 2008).

O interesse na capacidade de monitorar e detectar danos o mais cedo possível decorre do fato de que quanto mais cedo forem detectados, menor o custo de

manutenção e reparação das estruturas. Além do fato de avaliações periódicas adequadas prefinirem a estrutura contra falhas e possibilidade de colapso. Visto isto, a principal motivação desta pesquisa é avaliar a aplicabilidade da técnica FDD em detectar pequenos danos em vigas para que seja possível o monitoramento de estruturas, já que a utilização dessa técnica permite que as análises sejam feitas sem interdição da mesma e de forma prática.

Ressalta-se que neste trabalho considerou-se a utilização de somente um equipamento com sensores triaxiais de aceleração, posicionado em um único ponto sobre a viga. Dessa forma, não se fez necessário a passagem de cabos ou utilização de arranjos complicados, como ocorre quando se utilizam diversos equipamentos ou conjunto de sensores. Assim, o ensaio se tornou bastante simples, rápido e econômico, o que torna sua aplicação bem competitiva.

1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa se limita por alguns parâmetros. Dentre eles, pode-se citar:

- Restrição no número de equipamentos disponíveis para os ensaios experimentais, impossibilitando de captar os modos de vibração, pois será considerado medições em um ponto;
- Dificuldades inerentes à aquisição de dados experimentais, como: alinhamento da viga; representação das vinculações; ausência de controle sobre a ação e presença de ruídos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo eles: introdução; revisão teórica; metodologia; resultados; discussão e conclusão.

O capítulo 2 apresenta a revisão teórica sobre o tema, apresentando uma breve contextualização sobre a análise modal e processamento de sinais, além de descrever um panorama sobre os métodos de detecção de danos, destacando alguns trabalhos já desenvolvidos na área, tanto considerando os métodos baseados em dados quanto os métodos baseados em modelos.

O capítulo 3 detalha a metodologia utilizada no estudo, abordando as principais etapas necessárias para realização dos ensaios experimentais, descrevendo

sucintamente todas as características das vigas e dos parâmetros utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

O capítulo 4 discute os resultados encontrados e o capítulo 5 apresenta a discussão do trabalho, baseado na pergunta de pesquisa e nos resultados obtidos. O sexto e último capítulo deste documento apresenta as conclusões obtidas ao longo da realização do trabalho seguido de propostas para desenvolvimentos futuros. Por fim, os anexos contêm algumas informações necessárias para melhor entendimento da pesquisa desenvolvida.

2. REVISÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta os principais conceitos relacionados ao tema desta pesquisa, de forma a facilitar a compreensão do trabalho. Para isso, torna-se necessário o conhecimento sobre a detecção de danos no contexto da avaliação dinâmica estrutural e processamento de sinais. Também são citados os principais trabalhos desenvolvidos sobre o assunto.

2.1 ANÁLISE MODAL

Um dos métodos experimentais não destrutivos propostos para obtenção dos parâmetros dinâmicos é a análise modal operacional (OMA). A OMA permite a estimativa experimental dos parâmetros modais da estrutura a partir de medições da resposta de vibração apenas, sem a necessidade de se obter dados de entrada utilizando vibradores ou sistemas de aplicação de impulsos, como é feita na Análise Modal Experimental (EMA).

A OMA, é uma evolução da EMA e a ideia principal por trás da técnica é obter os parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento) utilizando apenas a resposta da estrutura devido às ações decorrentes da sua própria utilização, como forças ambientais e cargas operacionais (vento, tráfego de veículos, entre outros) (RAINIERI; FABBROCINO, 2014).

Além disso, a técnica da OMA tem se tornado atrativa para o mercado devido a um custo relativamente baixo e rapidez de implementação. Esses fatores impulsionaram o seu uso no monitoramento da integridade estrutural de diversos tipos de estrutura (BRINCKER; VENTURA, 2015).

As vibrações medidas devidas as ações decorrentes da própria utilização da estrutura são ditas aleatórias pois são variações temporais desconhecidas. Uma das características importantes da utilização dessas vibrações naturais e aleatórias é que essas apresentam aproximadamente comportamento de ruído de branco. Isso implica que todas as frequências do sinal possuem a mesma intensidade espectral, o que será útil no processamento de sinais (PEETERS; DE ROECK, 2001).

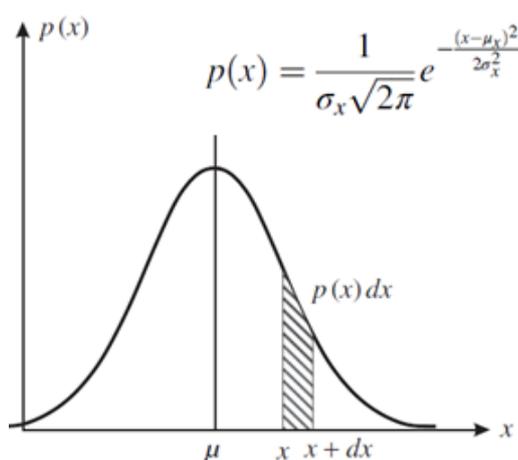
2.2 PROCESSAMENTO DE SINAIS

O processamento de sinais é um campo importante das engenharias e objetiva expandir elementos dos dados criando uma visão mais clara do problema físico em

análise. Em um processo de identificação modal, esse processamento se torna muito importante, principalmente quando as vibrações são aleatórias (BRINCKER; VENTURA, 2015).

Vibrações aleatórias são aquelas que não se conhece o comportamento exato e sua variação é incerta. Reconhecendo isso, uma variável aleatória pode ser descrita pela sua função de probabilidade. Normalmente o sinal medido procedente de ações aleatórias atende a uma distribuição de Gauss. Isso implica que os sinais apresentam média nula, podendo ser representados apenas pelo seu desvio padrão (RAINIERI; FABBROCINO, 2014).

Figura 1 - Função de probabilidade para variáveis aleatórias

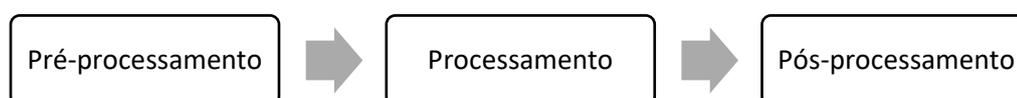


Fonte: (BRINCKER; VENTURA, 2015).

Como não é necessário o valor médio dos sinais medidos, todas as informações nos sinais estarão concentradas nas propriedades que são descritas pelas funções de correlação ou densidades espectrais, conceitos que serão abordados nos próximos itens (CUNHA; CAETANO, 2006).

O processamento pode ser dividido em três diferentes fases:

Figura 2 - Etapas do processamento de sinais



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

O pré-processamento corresponde a etapa onde é realizado a conferência e aprimoramento da qualidade do sinal fazendo uso de algumas técnicas. Dentre essas técnicas pode-se citar: calibração do sinal; a decimação que realiza a reamostragem do sinal para uma frequência de amostragem mais baixa e adequada; detrending removendo a tendência do sinal de modo a forçá-los a ter uma média zero, entre outros. No processamento ocorre a filtragem do sinal e são estimadas as funções de correlação e as funções de densidade espectral. O pós-processamento corresponde a análise dos dados obtidos e extração dos parâmetros modais.

A identificação dos parâmetros modais a partir do processamento de sinais pode ser realizada analisando os sinais no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Embora a amostragem ocorra no domínio do tempo, as vibrações usualmente são analisadas no domínio da frequência, uma vez que os métodos nesse domínio possuem aplicação mais simples e rápida (CUNHA; CAETANO, 2004). Para o caso desse estudo será realizado a decomposição no domínio da frequência dos dados registros de vibração, a fim de se obter as frequências naturais e taxas de amortecimento.

2.2.1 Teorema da Amostragem

O teorema da amostragem é fundamental para a análise de sinais digitais e diz que um sinal analógico $x(t)$ pode ser descrito unicamente por suas amostras, se e somente se, for amostrado considerando uma frequência maior que o dobro da largura de banda (ou seja, separação entre frequência mínima e máxima). Cumprido isso, o sinal pode ser reconstruído da seguinte forma (BRANDT, 2011):

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \text{sinc}[f_s(t - n\Delta t)] \quad (1)$$

onde

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (2)$$

A metade da frequência de amostragem ($f_s/2$) é definida como frequência de Nyquist. Então, se a frequência de amostragem é 400 Hz por exemplo, a faixa de

frequência (banda) é limitada de 0 a 200 Hz e qualquer informação sobre a estrutura além dessa frequência não pode ser determinada.

Se o teorema de amostragem é preenchido, o sinal amostrado é uma representação exata do sinal analógico. Caso isso não ocorra, ocorrerá um fenômeno chamado *aliasing* ou *frequency-folding*, que inviabiliza a correta representação do sinal, sendo esse descrito com uma frequência mais baixa (BRANDT, 2011).

2.2.2 Funções de correlação

As funções de correlação desempenham um papel importante na identificação modal apenas de saída, principalmente considerando que as respostas da estrutura geralmente são aleatórias. Portanto, é comum utilizar a teoria de processos estocásticos para se descrever o sinal (RAINIERI; FABBROCINO, 2014).

Dois conceitos são importantes quando se fala em funções de correlação: correlação cruzada e autocorrelação. A função de autocorrelação representa uma medida da similaridade que um sinal tem com sua versão deslocada no tempo (deslocado pelo tempo τ) e é definida como:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt \quad (3)$$

Já a correlação cruzada representa uma medida de similaridade entre um sinal e outro e pode ser demonstrada pela equação (4):

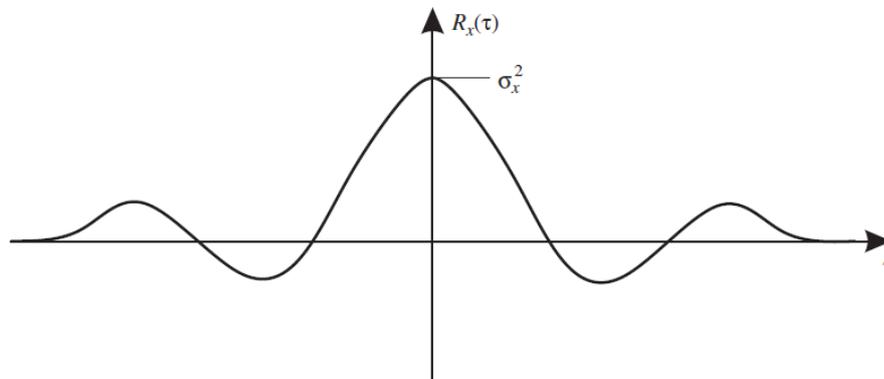
$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt \quad (4)$$

As equações 3 e 4 consideram que o sinal possui média nula.

A correlação entre dois sinais em um instante de tempo t é um número. Se este número for grande significa que os sinais são correlatos (parecidos) e se for pequeno significa que não são correlatos (diferentes).

A figura 3 mostra a função de autocorrelação ao longo de t onde é possível observar que para $t=0$ a função atinge o valor máximo e corresponde a variância.

Figura 3 - Comportamento da função de autocorrelação



Fonte: (BRINCKER; VENTURA, 2015).

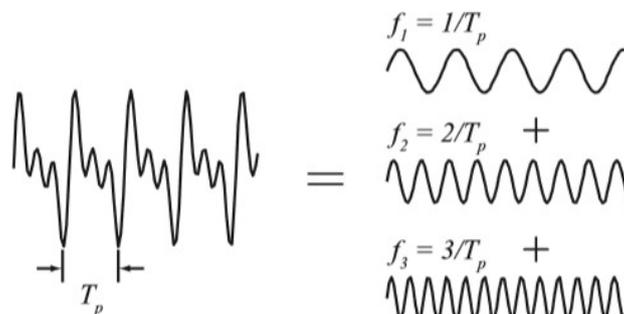
2.2.3 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é muito utilizada no processamento de sinal e se baseia na série real de Fourier. A ideia básica de uma série de Fourier é que todo sinal periódico pode ser representado por uma soma de senoides. Cada senoide tem sua amplitude e fase individuais. A formulação matemática para a série é dada por (BRANDT, 2011):

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi k}{T} t + b_k \sin \frac{2\pi k}{T} t \right) \quad (5)$$

Onde T representa o período do sinal. A figura abaixo esquematiza essa decomposição do sinal.

Figura 4 - Decomposição do sinal baseado na série de Fourier



Fonte: (BRANDT, 2011):

A equação 5 pode ser reescrita por um tratamento trigonométrico da seguinte forma:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a'_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t + \phi_k\right) \quad (6)$$

Onde as amplitudes a'_k e ângulos de fase ϕ_k são dados por:

$$a'_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (7)$$

$$\phi_k = \arctan\left(\frac{b_k}{a_k}\right) \quad (8)$$

A Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transformation*) é um algoritmo para transformar dados do domínio do tempo para o domínio de frequência baseados nos conceitos da série de Fourier. Esse algoritmo revolucionou aplicações envolvendo cálculos no espectro antes realizados por meio da transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*), proporcionando implementações de maneira muito mais rápida (TECHNOLOGIES, 2000).

2.2.4 Densidade espectral

Os sinais aleatórios possuem espectros contínuos, ou seja, eles contêm todas as frequências e podemos escrever o sinal a partir de um espectro de densidade, que chamamos de Densidade de energia do espectral (PSD - *Power Spectral Density*).

A PSD pode ser obtida por meio do procedimento de Blackman-Tukey e procedimento de Welch. No primeiro caso, a PSD é alcançada por meio da transformada direta de Fourier das funções de correlação. Já o método de Welch se baseia no fato de que as integrais de convolução para as funções de correlação dos sinais (no domínio da frequência) tornam-se apenas um produto entre dois sinais. Portanto, basta realizar a FFT de cada sinal separadamente e, em seguida, realizar o produto entre os sinais (RAINIERI e FABBROCINO, 2014).

A densidade espectral dessa forma está diretamente relacionada com as funções de correlação, como mostram as equações abaixo, onde $\mathcal{F} [R_{xx}(\tau)]$ corresponde à transformada de Fourier da função $R_{xx}(\tau)$.

$$S_{xx}(f) = \mathcal{F} [R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (9)$$

$$S_{yx}(f) = \mathcal{F} [R_{yx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (10)$$

Em aplicações práticas, os softwares calculam a PSD utilizando tanto o procedimento de Blackman-Tukey quanto o procedimento de Welch. Normalmente, utiliza-se mais a técnica de Welch, pois essa costuma ser menos exigente computacionalmente que o método de Blackman-Tukey, mas requer que se façam operações no sinal com intuito de melhorar a qualidade das estimativas (RAINIERI; FABBROCINO, 2014).

É importante destacar que as funções de correlação e as densidades espectrais carregam a mesma informação porque formam um par transformada direta/inversa de Fourier. Enquanto as funções de correlação são funções no domínio do tempo, as densidades espectrais no domínio de frequência (BRINCKER; VENTURA, 2015).

2.2.5 Decomposição no domínio da frequência

A decomposição do domínio da frequência (FDD - *Frequency Domain Decomposition*) foi desenvolvida por Brincker et al. (2001) e se baseia na teoria de que é possível organizar as funções de correlação utilizando a forma matricial da seguinte forma:

$$\mathbf{R}_y(\tau) = E [\mathbf{y}(t) \mathbf{y}^T(t + \tau)] \quad (11)$$

Onde $\mathbf{y}(t)$ corresponde as respostas da estrutura na forma de vetor:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{a}_1 q_1(t) + \mathbf{a}_2 q_2(t) + \dots = \mathbf{A}_q(t) \quad (12)$$

Sendo \mathbf{A}_q a matriz contendo os modos de vibração e $\mathbf{q}(t)$ um vetor coluna que representa as coordenadas modais. Usando a função de correlação da matriz \mathbf{A} e relacionando com a matriz \mathbf{R}_y chega-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_y(\tau) &= \mathbf{A}E[\mathbf{q}(t)\mathbf{q}^T(t+\tau)]\mathbf{A}^T \\ &= \mathbf{A}\mathbf{R}_q(\tau)\mathbf{A}^T \end{aligned} \quad (13)$$

Onde $\mathbf{R}_q(\tau)$ é a matriz de correlação das coordenadas modais. Aplicando a transformada de Fourier em ambos os lados da equação, obtêm-se a matriz de densidade espectral.

$$\mathbf{G}_y(f) = \mathbf{A}\mathbf{G}_q(f)\mathbf{A}^H \quad (14)$$

Assumindo que os modos de vibração não são correlacionados, então a matriz $\mathbf{G}_y(f)$ é diagonal e pode ser sintetizada da seguinte forma:

$$\mathbf{G}_y(f) = \mathbf{A}[g_n^2(f)]\mathbf{A}^H \quad (15)$$

Onde $g_n^2(f)$ são as densidades espectrais de $\mathbf{G}_y(f)$ (elementos diagonais). Realizando uma decomposição dos valores singulares (SVD – *Singular Value Decomposition*) da densidade espectral, a equação 15 assume a forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_y(f) &= \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{U}^H \\ &= \mathbf{U}[s_n^2]\mathbf{U}^H \end{aligned} \quad (16)$$

Dessa forma, os valores s_n^2 da matriz diagonal de \mathbf{S} representam os autovalores de $\mathbf{G}_y(f)$ e estão relacionados com as frequências naturais. Já o vetor singular $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots]$ deve ser interpretado como os modos de vibração da estrutura (BRINCKER; VENTURA, 2015).

2.3 APLICAÇÃO NA ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Para a detecção, localização e quantificação de danos em estruturas existem duas famílias de métodos que podem ser utilizados: os métodos baseados em dados vibracionais e os métodos baseados em modelos. Os métodos baseados em dados

objetivam detectar danos a partir de dados dinâmicos, como é o caso das acelerações, e podem ser classificados em métodos não-supervisionados, para os quais não é necessário ter conhecimento prévio dos sinais registrados; e métodos supervisionados, nos quais é necessário fornecer algumas informações prévias a respeito dos dados que serão utilizados (DOEBLING; FARRAR; PRIME, 1998).

No geral, esses métodos possibilitam atingir o nível 1 e em alguns casos o nível 2 na classificação de Ritter. Utilizam indicadores baseados nos parâmetros modais para localizar prováveis danos, podendo ser as frequências naturais ou modos de vibração. As principais vantagens são a possibilidade de utilizar número reduzido de sensores e realizar as medições de forma mais prática. Já os métodos baseados em modelos propõem localizar e a quantificar o dano estrutural. É necessário a geração de um modelo numérico e as principais dificuldades nesses métodos são: obter modelos numéricos confiáveis e o tempo despendido para calibração dos mesmos (ALVES, 2016).

A maioria das pesquisas mais antigas voltadas para identificação de danos baseados em dados, utilizavam as frequências naturais da estrutura. A observação de que mudanças nas propriedades estruturais deviam causar mudanças correspondentes nas frequências de vibração foi o ímpeto para usar métodos modais para identificação de danos e monitoramento da integridade estrutural (DOEBLING; FARRAR; PRIME, 1998).

Um dos primeiros estudos focado na utilização das frequências naturais como uma medida de dano foram desenvolvido por Cawley e Adams, onde eles afirmaram que a medição das frequências naturais antes da estrutura ser colocada em serviço e as medições em dois ou mais estágios de sua vida útil possibilitava localizar danos e atestar sobre sua integridade (CAWLEY; ADAMS, 1979).

Salawu (1997) fez uma extensa revisão do uso da frequência natural como parâmetro diagnóstico, destacando que as maiores vantagens de se utilizar as frequências naturais estão relacionadas ao baixo custo de implementação da técnica. Por outro lado, efeitos devido a fatores ambientais, como temperatura e umidade, podem influenciar nas mudanças das características dinâmicas, diminuindo a precisão do método. Farrar e Doebling (1997) também desenvolveram um estudo de revisão sobre o tema apontando que o uso das frequências naturais para detecção de danos já é algo consolidado na literatura, mas as medições carecem ser muito precisas

devido à baixa sensibilidade dos desvios de frequência ou a gravidade dos danos tem que ser muito representativa para que a técnica consiga captar esses danos.

Owolabi *et al.* (2003) realizaram investigações experimentais dos efeitos de rachaduras e danos na integridade de estruturas em vigas de alumínio. Foram introduzidas trincas em sete locais diferentes ao longo do comprimento da viga, variando a profundidade dessas trincas. As três primeiras frequências naturais e as amplitudes da resposta de frequência medidas foram utilizadas como um esquema de detecção de danos com o objetivo de identificar, quantificar e determinar suas extensões e localizações.

Garescì *et al.* (2006) definiram uma metodologia de detecção de danos combinando dados experimentais e dados numéricos obtidos a partir do método dos elementos finitos. A combinação permitiu determinar de forma precisa a presença e localização dos danos a partir da comparação entre as frequências naturais e modos de vibração obtidos experimentalmente

Rodríguez *et al.* (2010) desenvolveram um método para a detecção e avaliação estrutural de danos em edifícios. O método foi baseado nos modos de vibração extraídos a partir da medição das frequências de vibração da estrutura danificada junto com a averiguação da rigidez lateral do primeiro andar da estrutura intacta. Por meio de um processo iterativo, baseado na decomposição de valores singulares, foi possível identificar a localização e a gravidade do dano devido a alteração da rigidez, utilizando um modelo analítico.

Elshafey *et al.* (2011) examinaram a viabilidade e aplicabilidade de dados experimentais baseados nas frequências e modos de vibração para detectar e localizar danos em uma viga de aço fixada em uma extremidade e articulada em outra. Um teste modal foi realizado utilizando martelos de impacto para excitar a estrutura e foi realizada uma comparação dos resultados encontrados para a estrutura intacta e com 25%, 50% e 75% de danos. Os resultados obtidos indicam um bom potencial para que a técnica pode ser usada na identificação e na localização do dano.

Ursos *et al.* (2017) analisaram um processo inverso. O objetivo foi propor um método analítico para estimar as frequências naturais de vigas danificadas com base em formulas teóricas. As frequências naturais foram obtidas analiticamente usando a fórmula teórica e os autores propuseram uma modificação dessa fórmula, de tal forma que as frequências possam ser determinadas em estruturas localmente danificadas.

Isso é feito usando uma função multiplicadora aplicada à fórmula existente, modificando o valor do resultado. O método proposto inclui uma função multiplicadora em termos da extensão da área de redução, comprimento e localização dos danos. Exemplos práticos mostraram que o método é uma boa alternativa para estimar frequências de estruturas danificadas.

Os métodos de identificação de danos baseados em modelos começaram a ser desenvolvidos e pesquisados a partir da década de 80. O principal interesse em estudar esses métodos era o fato deles permitirem alcançar níveis mais avançados segundo a classificação de Ritter (Nível 3 e 4). A ideia do método é atualizar o modelo numérico com o intuito de minimizar diferenças entre os indicadores de dano medidos experimentalmente e os obtidos nesse modelo. Portanto, geralmente esse processo é alcançado utilizando métodos iterativos, com auxílios de algoritmos de otimização (ALVES, 2016).

Mosallam *et al.* (2018) apresentaram um estudo sobre a detecção de danos em uma estrutura de estrutura de aço instrumentada considerando uma rede de sensores e acelerômetros utilizando duas abordagens. Na primeira, um modelo de elementos finitos foi calibrado para simular a estrutura e usado para localizar e quantificar a perda de rigidez com base nos parâmetros modais medidos experimentalmente. Além disso, um algoritmo de busca direta foi usado para minimizar uma função objetivo que representa a diferença entre os parâmetros dinâmicos previstos e medidos da estrutura. Os resultados demonstraram a capacidade das duas abordagens em identificar danos.

Tiachacht *et al.* (2018) apresenta uma nova metodologia para identificação e quantificação de danos em sistemas bidimensionais e tridimensionais, utilizando modelo numérico baseado no método dos elementos finitos propondo um indicador de dano combinado com algoritmo genético (GA) para quantificação adicional do dano detectado. A técnica proposta é eficiente para estimar a gravidade dos danos estruturais, quando comparada com outras técnicas da literatura.

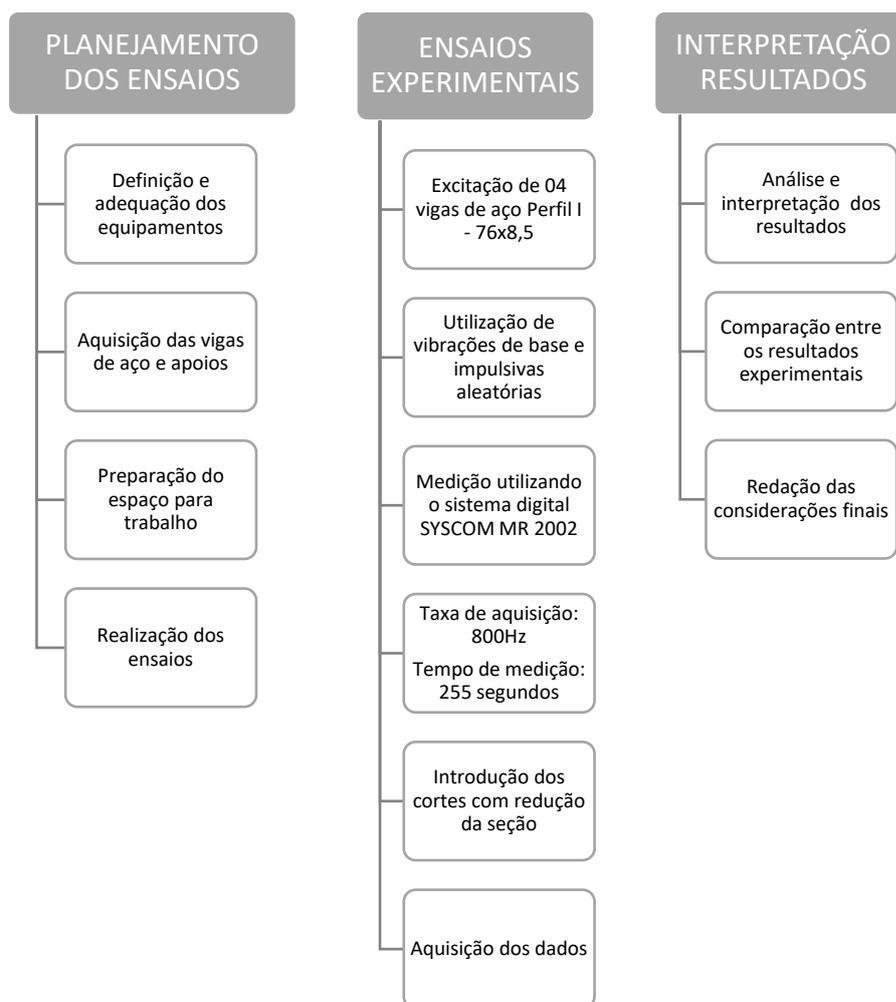
Muitos trabalhos se desenvolveram e veem sendo desenvolvidos para a detecção de danos, tanto utilizando métodos baseados em dados quanto os métodos baseados em modelos. Ou até mesmo a combinação dos métodos, um funcionando como complemento do outro. A maioria dos métodos encontrados na literatura se limita a detectar e a localizar dano, o que é suficiente muitas vezes nas análises.

Para este trabalho, apesar das dificuldades citadas pelos autores em utilizar apenas as mudanças nas frequências naturais na detecção de danos, busca-se determinar qual nível de alteração de rigidez das vigas pode ser detectado (detecção de danos nível 1), introduzindo pequenos danos nas vigas de aço. As taxas de amortecimento também foram alcançadas, mas uma vez que sua obtenção é bastante imprecisa (como reportado em diversos trabalhos técnicos internacionais), esta não foi utilizada na identificação de danos.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foi elaborado um planejamento contendo as principais etapas que deverão ser realizadas e qual a metodologia adotada para alcançar os objetivos do estudo.

Figura 5 - Planejamento inicial da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

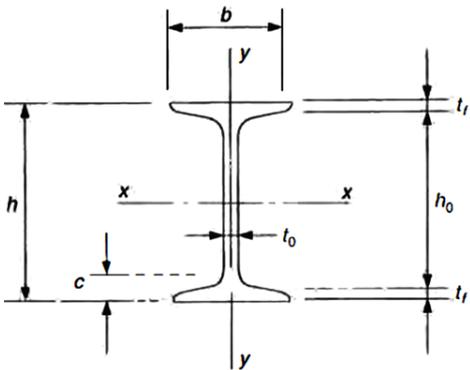
3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A análise experimental contempla a realização de ensaios dinâmicos em vigas de aço, variando o comprimento das vigas, a magnitude dos dados, sua localização e posição dos sensores. O espaço escolhido para realização dos ensaios de laboratório está localizado no subsolo do Prédio 18, onde funciona o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC) do CEFET-MG - Campus 2.

Foram ensaiadas quatro vigas de aço, Perfil I Laminado Padrão Americano, cujas características geométricas e do material foram obtidas de catálogos fornecidos pelo fabricante e estão expostas na tabela 1.

Tabela 1 - Características geométricas e do material das vigas testadas

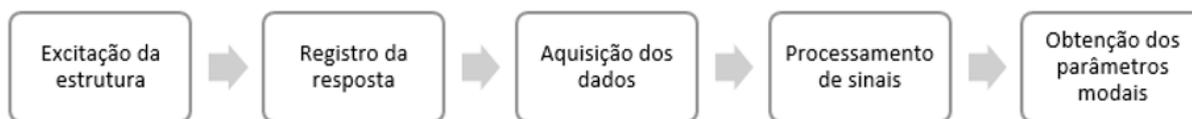
Perfil I – 76 x 8,5	
h (mm)	76,2
h ₀ (mm)	63,0
c (mm)	14,3
t _f médio (mm)	6,6
t ₀ (mm)	4,32
b (mm)	59,2
Área (cm ²)	10,8
I _x (cm ⁴)	105,1
W _x (cm ³)	27,6
i _x (cm)	3,12
I _y (cm ⁴)	18,9
W _y (cm ³)	6,41
i _y (cm)	1,33
Z _x (cm ³)	32,0
Z _y (cm ³)	10,7
E (GPa)	200
ρ (Kg/m ³)	7850,0
Poisson	0,30
P (Kg/m)	8,5



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

O ensaio dinâmico consiste em excitar a estrutura para obter as respostas (deslocamento, velocidade ou aceleração) a partir das quais serão extraídos os parâmetros modais. Essa técnica de ensaio como foi citada no item 2.1, também conhecida como *Output Only*, usa apenas a resposta da estrutura. O esquema abaixo apresenta as etapas que serão seguidas no ensaio:

Figura 6 - Etapas ensaio dinâmico.



Fonte: Adaptado (CARDOSO, 2005)

Para o caso deste trabalho a resposta medida é a aceleração, utilizando o sistema digital de aquisição de dados SYSCOM MR2002. O equipamento possui acelerômetros triaxial agrupados em um sistema compacto. Os acelerômetros foram programados para uma taxa de aquisição de 800Hz, o que de acordo com o Teorema de Nyquist permite captar frequências de 0 até 400Hz. O tempo de duração de cada medição realizada foi de 255 segundos (ou seja, 204.000 pontos por medição).

Figura 7 – Sistema de aquisição (esquerda) e acelerômetros (direita)



Fonte: SYSCOM Instruments, 2019.

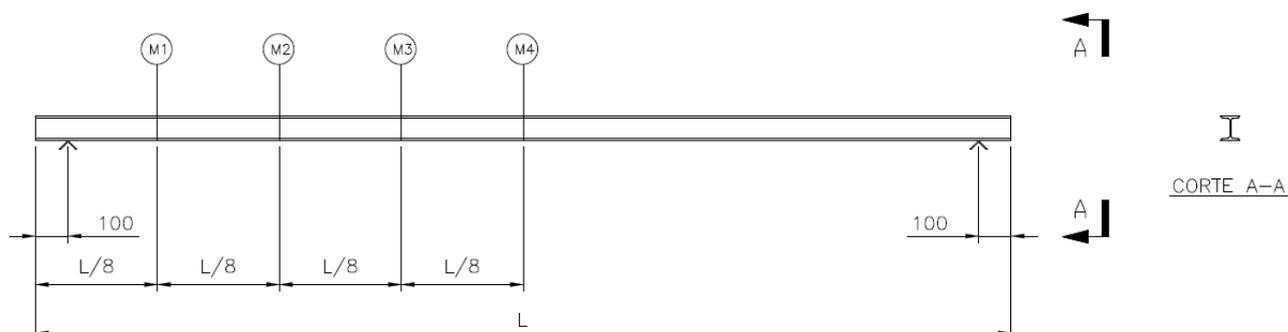
Dois tipos de excitações aleatórias foram considerados para cada ensaio realizado:

- Vibrações de base aleatórias devido ao movimento de veículos, circulação de pessoas, entre outros.
- Vibrações impulsivas aleatórias produzidas por um martelo de borracha.

As vigas foram apoiadas em duas cantoneiras de 60 cm simulando de forma aproximada uma condição de viga bi apoiada. Os apoios foram posicionados a 10 cm das extremidades da viga. Para cada viga, foram consideradas quatro posições diferentes para captação das vibrações (M1=1/8, M2=1/4, M3=3/8 e M4=1/2 da viga).

O desenho esquemático abaixo (figura 8) mostra o croqui das vigas indicando essas posições.

Figura 8 - Croqui das vigas – Medidas em mm



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

A tabela 2 relaciona os comprimentos das vigas que foram ensaiadas. O objetivo foi ensaiar dois conjuntos de vigas: duas vigas de comprimento maior e duas de comprimento menor iguais, para comparar a posição da introdução dos cortes. Os comprimentos das vigas apresentam mínimas diferenças devido ao processo de corte do perfil enviado pelo fabricante.

Tabela 2 - Comprimento das vigas

Comprimento total da viga
L1=3,02m
L2=3,038m
L3=1,50m
L4=1,51m

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Cortes foram introduzidos para simular os danos reduzindo o comprimento do perfil (Valor de “b”) como mostra a tabela 3 pois, por se tratar de um perfil americano, as abas possuem medidas variáveis. Isso gerou uma redução da área da seção transversal de aproximadamente 2,25%, 8,15%, 16,3%, 21,36% e 24,45% para cada viga ensaiada (L1, L2, L3 e L4). A tabela 3 também relaciona as variações de áreas e das inércias obtidas ao se realizar os cortes.

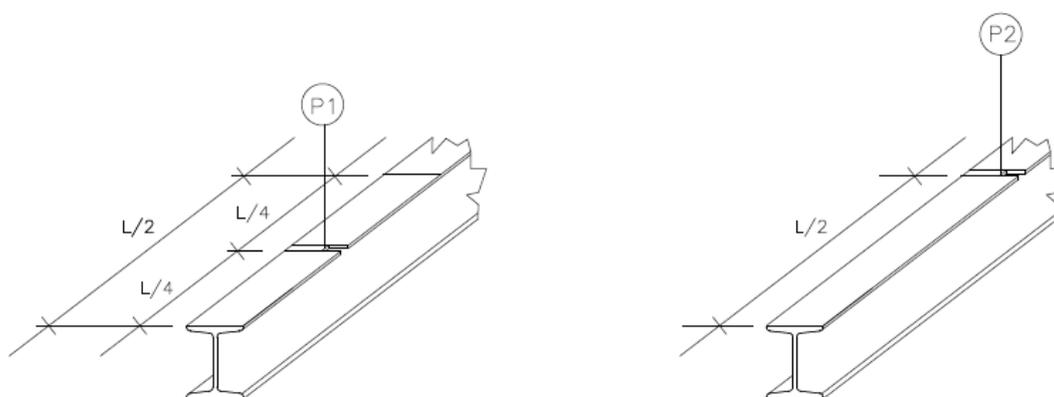
Os cortes foram feitos a $\frac{1}{4}$ da viga (posição P1) nas vigas L2 e L4 e no meio da viga (posição P2) nas vigas L1 e L3 são apresentados nas figuras 9 e 10. A figura 11 apresenta todos os cortes que foram realizados.

Tabela 3 - Relação da proporção dos danos nas vigas com a variação das áreas/ inércias

Danos	Comprimento (cm)	Área da viga (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)
Sem danos	-	10,58	103,66	19,38
Dano de 2,25%	0,5	10,34	100,63	17,57
Dano de 8,15%	0,15	9,57	90,84	13,78
Dano de 16,3%	0,30	8,85	78,11	11,19
Dano de 21,36%	0,40	8,32	73,89	7,55
Dano de 24,45%	0,45	7,99	71,13	6,25

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 9 - Posição dos cortes nas vigas.



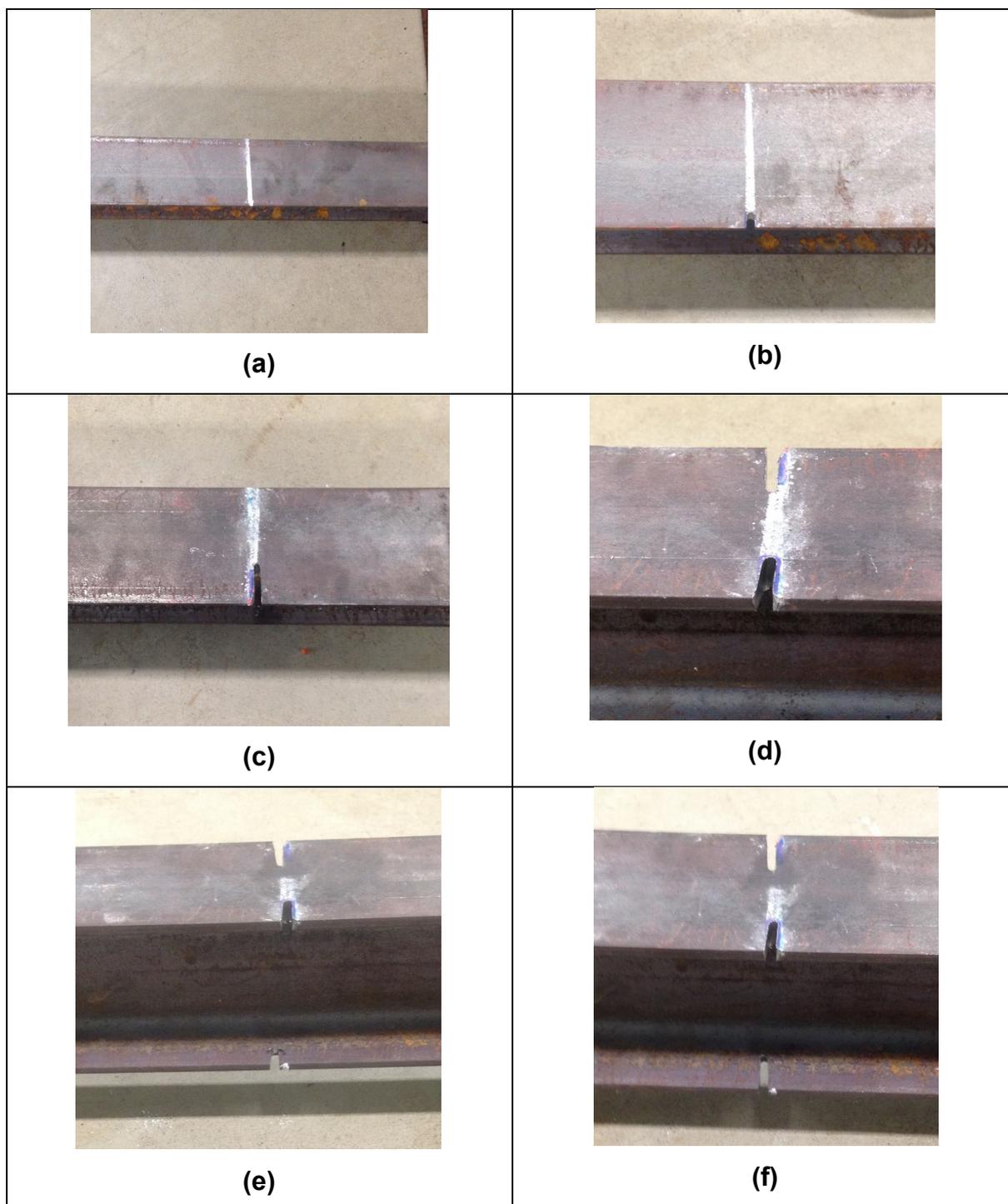
Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 10 - Serra Mármore utilizada para realizar os cortes.



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 11 - Danos introduzidos nas vigas (a) Sem danos (b) 2,25% (c) 8,25% (d) 16,3% (e) 21,36% (f) 24,45%



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

É importante destacar que antes da introdução dos cortes, cada viga foi ensaiada na condição sem danos, para obter os parâmetros de referência, pois dessa

forma é possível avaliar se a resposta dinâmica da estrutura está mudando do estado inicial para o estado atual considerado. Além disso, cada ensaio foi realizado uma única vez.

Com o intuito de precaver possíveis ruídos que possam ocultar mudanças na resposta da estrutura levando-se a uma hipótese de dano incorreto, a cada ensaio de vibração foi determinada a temperatura no laboratório utilizando um termômetro a laser. O valor medido está representado no ANEXO B, mas as variações não foram significativas.

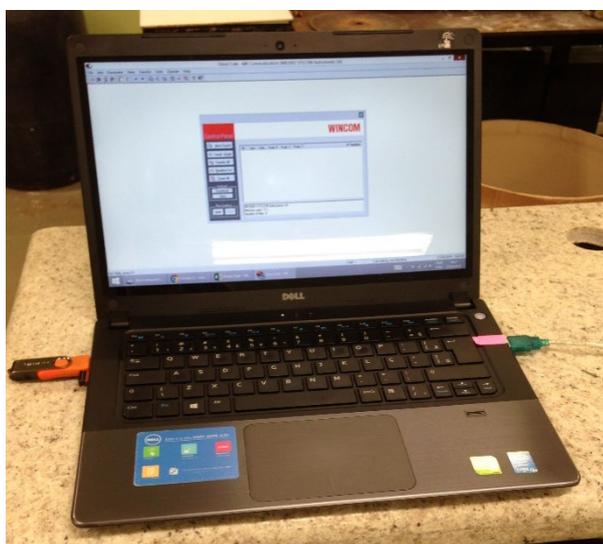
Foram realizados ao todo 196 ensaios. Apesar do número elevado, estes foram possíveis de serem concluídos num período de 30 dias devido a sua praticidade. O ANEXO B sintetiza o detalhamento desses ensaios.

Figura 12 - Viga sendo ensaiada



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Figura 13 - Computador conectado com software para aquisição dos dados

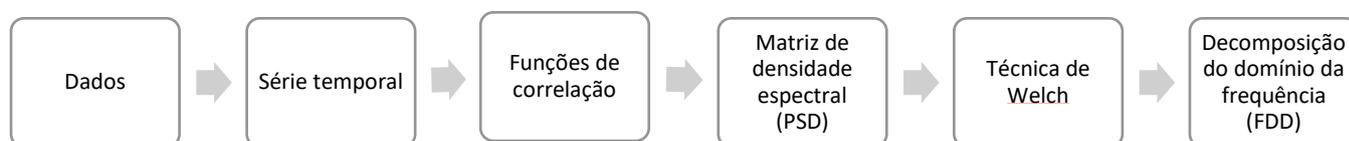


Fonte: Elaborado pela autora (2019)

3.1.1 Obtenção dos parâmetros modais

Para a obtenção dos parâmetros modais das estruturas, os dados obtidos nos ensaios foram processados em um software desenvolvido no CEFET-MG em Fortran, onde aplicou-se a técnica de decomposição no domínio da frequência. Os sinais das acelerações captados no ensaio são processados nas rotinas abaixo até a obtenção dos parâmetros modais.

Figura 14 - Rotinas executadas pelo software



Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Para efetuar o processamento alguns parâmetros importantes foram definidos a fim de evitar erros, melhorar a qualidade do sinal e minimizar ruídos. Um parâmetro importante para ser determinado é o valor para o tamanho da transformada de Fourier (*nfft*). Esse parâmetro define a resolução do espectro, ou seja, número de pontos utilizados para sua construção e geralmente é definido como uma potência de 2. Para esse trabalho foi adotado $nfft = 2048$.

Outro critério importante é o fator de decimação que realiza a reamostragem do sinal para uma frequência de amostragem mais baixa e adequada. Nessa pesquisa foi adotado decimação igual a 4 para vigas L1 e L2 e decimação igual a 2 para vigas L3 e L4. A taxa de amortecimento máxima, utilizada na identificação dos picos do espectro de frequências, foi definida em 10% devido as grandes incertezas relacionadas à obtenção deste parâmetro modal. Este valor é bem conservador pois para problemas usuais de engenharia envolvendo estruturas metálicas, as taxas de amortecimento são normalmente inferiores a 3%.

Inicialmente, o programa lê os arquivos SYSCOM e converte para o formato .txt. Após a leitura dos sinais a primeira rotina normaliza o sinal, elimina tendências e as vibrações então são organizadas em uma matriz contendo o registro das acelerações nos três canais (x, y e z). A segunda rotina organiza as funções de correlação das series temporais, para posteriormente, a partir da realização da

transformada de Fourier, ser obtida as matrizes de densidade espectral, assim como explica os subitens do item 2.3 deste documento.

A técnica utilizada para esse processamento foi a de Welch, e a partir da decomposição do domínio da frequência, com a aplicação do SVD foi possível extrair os parâmetros modais para os ensaios experimentais realizados.

4. RESULTADOS

A partir do processamento de sinais dos ensaios realizados foi possível obter os resultados da pesquisa. O software desenvolvido em Fortran e utilizado nesse trabalho consegue captar automaticamente picos nos espectros. As frequências naturais podem ser interpretadas como os maiores picos da série de dados. Foi possível definir os dois primeiros picos a partir da decomposição do domínio da frequência, que correspondem aos dois primeiros modos de vibração.

Para auxiliar na identificação das primeiras frequências naturais encontradas utiliza-se como base as fórmulas analíticas obtidas na literatura para identificação de frequências em vigas bi apoiadas (CLOUGH; PENZIEN, 1995):

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (17)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade do aço, I momento de inércia da peça, L o comprimento, n depende de qual modo estou analisando ($n=1,2,3\dots$). O cálculo realizado considerou as características geométricas e do material das vigas expostas na tabela 1. O 1º. modo encontrado é o modo horizontal e o 2º. modo vertical.

Tabela 4 - Frequências naturais obtidas por fórmula analítica

Viga	L(m)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	A (cm ²)	E (GPa)	ρ (Kg/m ³)	ω _y	ω _z
L1	3.02	105,1	18,9	10,58	210	7650	12.06071	28.44091
L2	3.038	105,1	18,9	10,58	210	7650	11.91822	28.10488
L3	1.50	105,1	18,9	10,58	210	7650	48.88823	115.2855
L4	1.51	105,1	18,9	10,58	210	7650	48.24285	113.7636

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

As tabelas 5 a 12 apresentam as frequências naturais encontradas para cada viga a partir do processamento de sinais realizado e os resultados foram divididos em Vibrações de impacto e Vibrações de base. Cada ensaio foi realizado uma vez em cada posição e em cada porcentagem de danos.

4.1 RESULTADOS PARA VIGA L1 (3,02M)

Vibrações de Impacto

Tabela 5 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L1

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais (Hz)					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	11.52	11.52	10.94	10.84	10.25	10.04
	2	36.02	34.77	34.47	33.79	32.23	32.65
M2=1/4	1	12.50	12.50	12.40	11.72	11.04	10.74
	2	34.77	34.67	33.69	33.11	32.62	31.03
M3=3/8	1	12.11	11.82	11.72	11.52	10.45	10.05
	2	34.96	34.96	34.86	34.38	32.32	30.18
M4=1/2	1	12.50	12.50	12.40	11.72	10.74	10.64
	2	34.47	34.08	33.40	33.30	32.62	32.42

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Vibração de Base

Tabela 6 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base - Viga L1

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais (Hz)					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	12.50	12.50	11.23	11.00	10.45	10.16
	2	34.77	34.77	34.18	34.06	33.01	32.13
M2=1/4	1	12.50	12.50	11.72	10.74	10.94	9.77
	2	35.16	35.16	33.59	34.08	33.59	33.57
M3=3/8	1	12.89	12.50	11.23	10.55	10.35	9.08
	2	35.16	34.47	34.47	33.69	33.69	33.30
M4=1/2	1	12.40	12.40	11.91	11.72	10.95	10.55
	2	35.45	34.38	34.28	33.79	33.01	32.91

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

4.2 RESULTADOS PARA VIGA L2 (3,038M)

Vibrações de Impacto

Tabela 7 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L2

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	12.79	12.79	11.72	11.62	10.74	9.77
	2	35.45	35.35	33.50	32.52	32.02	30.37
M2=1/4	1	13.48	13.28	13.28	11.04	10.74	10.06
	2	33.40	33.40	33.01	32.32	32.32	29.88
M3=3/8	1	12.30	12.30	12.40	11.52	10.35	10.16
	2	35.16	34.77	34.02	33.03	33.03	32.71
M4=1/2	1	12.30	12.30	12.11	11.13	10.74	10.45
	2	35.94	35.45	35.55	34.86	34.00	33.79

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Vibração de Base

Tabela 8 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base- Viga L2

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais (Hz)					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	12.38	12.02	11.72	11.04	10.84	10.06
	2	35.55	35.55	34.77	34.77	33.20	32.32
M2=1/4	1	13.48	13.28	13.28	11.04	10.74	10.06
	2	34.67	34.38	33.01	32.81	32.32	29.88
M3=3/8	1	12.30	12.30	12.29	11.52	10.35	10.16
	2	33.30	32.13	32.13	31.45	31.33	31.05
M4=1/2	1	12.60	12.60	12.11	11.13	10.74	10.45
	2	35.94	35.16	35.55	34.86	34.04	33.79

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

4.3 RESULTADOS PARA VIGA L3 (1,50M)

Vibrações de Impacto

Tabela 9 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L3

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais (Hz)					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	53.42	52.83	52.34	52.05	51.86	51.66
	2	117.48	114.94	112.60	110.65	109.38	109.00
M2=1/4	1	54.30	54.10	53.42	52.92	52.44	52.25
	2	116.80	114.84	113.18	112.01	110.45	110.35
M3=3/8	1	53.03	52.83	52.64	51.66	51.46	50.68
	2	116.90	116.00	115.72	115.33	114.84	114.06
M4=1/2	1	53.13	53.03	52.83	52.44	52.05	51.86
	2	114.84	113.09	112.70	112.40	112.01	108.69

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Vibração de Base

Tabela 10 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base - Viga L3

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais (Hz)					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	52.54	52.54	51.17	51.46	50.29	50.20
	2	117.48	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98
M2=1/4	1	51.46	51.27	51.17	51.00	50.00	49.61
	2	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.96
M3=3/8	1	51.56	51.46	51.17	50.20	50.20	50.02
	2	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
M4=1/2	1	53.61	53.22	52.30	51.76	50.88	50.10
	2	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.97

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

4.4 RESULTADOS PARA VIGA L4 (1,51M)

Vibrações de Impacto

Tabela 11 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de impacto - Viga L4

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais (Hz)					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	53.42	52.83	51.95	51.86	50.49	50.00
	2	117.48	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98
M2=1/4	1	53.00	52.30	51.07	50.49	50.00	50.00
	2	1.00	0.99	0.96	0.95	0.94	0.94
M3=3/8	1	52.54	51.46	51.17	50.20	50.20	50.02
	2	1.00	0.98	0.99	0.99	0.98	0.97
M4=1/2	1	53.52	53.52	53.03	52.15	51.76	51.55
	2	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Vibração de Base

Tabela 12 - Frequências naturais (Hz) - Vibrações de base - Viga L4

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais (Hz)					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	53.30	52.43	52.44	52.05	51.95	51.66
	2	115.48	114.94	113.09	110.65	109.38	109.00
M2=1/4	1	53.42	53.42	52.34	52.15	51.46	50.88
	2	116.80	116.80	116.05	115.02	115.00	114.65
M3=3/8	1	53.71	53.71	52.83	51.07	50.98	50.68
	2	116.90	116.00	115.72	115.33	115.45	114.06
M4=1/2	1	53.81	53.71	53.13	53.61	52.06	51.37
	2	116.30	116.30	116.00	114.95	114.75	113.30

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

5. DISCUSSÃO

Diante dos resultados obtidos para o estudo das quatro vigas de aço, é possível observar o comportamento das frequências naturais à medida que os danos são introduzidos. Analisando as tabelas 5 a 12 foi possível verificar uma pequena diminuição das frequências naturais do pórtico proporcional aos cortes que foram realizados. Esse resultado se baseia na consolidação da equação abaixo, onde k representa a rigidez e m a massa da estrutura (CLOUGH; PENZIEN, 1995):

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (18)$$

Dessa forma, seguindo a equação 18, se a rigidez da estrutura está decrescendo, a frequência natural irá diminuir. Esta premissa foi atendida, mesmo que de maneira sutil, em praticamente todos os ensaios de campo realizados. Algumas exceções ocorreram nos ensaios experimentais de modo que a frequência natural se manteve constante ou mesmo aumentou, ao contrário da diminuição que deveria ocorrer. Esse fato pode estar relacionado a presença de ruídos e falha na aquisição em excitar de forma adequada determinados modos por ter uma amplitude muito baixa.

Para facilitar a compreensão e a comparação entre os itens estudados na pesquisa, os resultados também podem ser interpretados sob a ótica de valores relativos. As tabelas 13 a 20 apresentam esses resultados, mostrando também a média da variação das duas primeiras frequências naturais identificadas.

- Viga L1

Vibrações de impacto

Tabela 13 - Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL1 p/ vibração de impacto

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	100.00%	94.97%	94.10%	88.98%	87.15%
	2	100.00%	96.53%	95.70%	93.81%	89.48%	90.64%
	Média	100.00%	98.26%	95.33%	93.95%	89.23%	88.90%
M2=1/4	1	100.00%	100.00%	99.20%	93.76%	88.32%	85.92%
	2	100.00%	99.71%	96.89%	95.23%	93.82%	89.24%
	Média	100.00%	99.86%	98.05%	94.49%	91.07%	87.58%
M3=3/8	1	100.00%	97.61%	96.78%	95.13%	86.30%	82.99%
	2	100.00%	100.00%	99.71%	98.34%	92.45%	86.33%
	Média	100.00%	98.81%	98.25%	96.74%	89.37%	84.66%
M4=1/2	1	100.00%	100.00%	99.20%	93.76%	85.92%	85.12%
	2	100.00%	98.87%	96.90%	96.61%	94.63%	94.05%
	Média	100.00%	99.43%	98.05%	95.18%	90.28%	89.59%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Vibrações de base

Tabela 14 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL1 p/ vibração de base

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	100.00%	89.84%	88.00%	83.60%	81.28%
	2	100.00%	100.00%	98.30%	97.96%	94.94%	92.41%
	Média	100.00%	100.00%	94.07%	92.98%	89.27%	86.84%
M2=1/4	1	100.00%	100.00%	93.76%	85.92%	87.52%	78.16%
	2	100.00%	100.00%	95.54%	96.94%	95.54%	95.49%
	Média	100.00%	100.00%	94.65%	91.43%	91.53%	86.82%
M3=3/8	1	100.00%	96.97%	87.12%	81.82%	80.29%	70.44%
	2	100.00%	98.05%	98.05%	95.83%	95.83%	94.72%
	Média	100.00%	97.51%	92.58%	88.82%	88.06%	82.58%
M4=1/2	1	100.00%	100.00%	96.05%	94.52%	88.31%	85.08%
	2	100.00%	96.98%	96.70%	95.32%	93.12%	92.83%
	Média	100.00%	98.49%	96.37%	94.92%	90.71%	88.96%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

- Viga L2

Vibrações de impacto

Tabela 15 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL2 p/ vibração de impacto

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	100.00%	91.63%	90.85%	83.97%	76.39%
	2	100.00%	99.72%	94.50%	91.73%	90.32%	85.67%
	Média	100.00%	99.86%	93.07%	91.29%	87.15%	81.03%
M2=1/4	1	100.00%	98.52%	98.52%	81.90%	79.67%	74.63%
	2	100.00%	100.00%	98.83%	96.77%	96.77%	89.46%
	Média	100.00%	99.26%	98.67%	89.33%	88.22%	82.05%
M3=3/8	1	100.00%	100.00%	100.81%	93.66%	84.15%	82.60%
	2	100.00%	98.89%	96.76%	93.94%	93.94%	93.03%
	Média	100.00%	99.45%	98.79%	93.80%	89.04%	87.82%
M4=1/2	1	100.00%	100.00%	98.46%	90.49%	87.32%	84.96%
	2	100.00%	98.64%	98.91%	96.99%	94.60%	94.02%
	Média	100.00%	99.32%	98.69%	93.74%	90.96%	89.49%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Vibrações de base

Tabela 16 - Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL2 p/ vibração de base

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	97.09%	94.67%	89.18%	87.56%	81.26%
	2	100.00%	100.00%	97.81%	97.81%	93.39%	90.91%
	Média	100.00%	98.55%	96.24%	93.49%	90.48%	86.09%
M2=1/4	1	100.00%	98.52%	98.52%	81.90%	79.67%	74.63%
	2	100.00%	99.16%	95.21%	94.64%	93.22%	86.18%
	Média	100.00%	98.84%	96.86%	88.27%	86.45%	80.41%
M3=3/8	1	100.00%	100.00%	99.92%	93.66%	84.15%	82.60%
	2	100.00%	96.49%	96.49%	94.44%	94.08%	93.24%
	Média	100.00%	98.24%	98.20%	94.05%	89.12%	87.92%
M4=1/2	1	100.00%	100.00%	96.11%	88.33%	85.24%	82.94%
	2	100.00%	97.83%	98.91%	96.99%	94.71%	94.02%
	Média	100.00%	98.91%	97.51%	92.66%	89.98%	88.48%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

- Viga L3

Vibrações de impacto

Tabela 17 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL3 p/ vibração de impacto

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	98.90%	97.98%	97.44%	97.08%	96.71%
	2	100.00%	97.84%	95.85%	94.19%	93.11%	92.78%
	Média	100.00%	98.37%	96.91%	95.81%	95.09%	94.74%
M2=1/4	1	100.00%	99.63%	98.38%	97.46%	96.57%	96.22%
	2	100.00%	98.32%	96.90%	95.90%	94.56%	94.48%
	Média	100.00%	98.98%	97.64%	96.68%	95.57%	95.35%
M3=3/8	1	100.00%	99.62%	99.26%	97.42%	97.04%	95.57%
	2	100.00%	99.23%	98.99%	98.66%	98.24%	97.57%
	Média	100.00%	99.43%	99.13%	98.04%	97.64%	96.57%
M4=1/2	1	100.00%	99.81%	99.44%	98.70%	97.97%	97.61%
	2	100.00%	98.48%	98.14%	97.88%	97.54%	94.64%
	Média	100.00%	99.14%	98.79%	98.29%	97.75%	96.13%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Vibrações de base

Tabela 18 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL3 p/ vibração de base

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	100.00%	97.40%	97.94%	95.72%	95.55%
	2	100.00%	99.51%	99.25%	98.08%	97.89%	97.84%
	Média	100.00%	99.75%	98.32%	98.01%	96.80%	96.69%
M2=1/4	1	100.00%	99.63%	99.44%	99.11%	97.16%	96.40%
	2	100.00%	99.63%	99.44%	99.11%	97.16%	96.40%
	Média	100.00%	99.63%	99.44%	99.11%	97.16%	96.40%
M3=3/8	1	100.00%	99.81%	99.24%	97.36%	97.36%	97.01%
	2	100.00%	99.23%	98.99%	98.66%	98.37%	97.57%
	Média	100.00%	99.52%	99.12%	98.01%	97.87%	97.29%
M4=1/2	1	100.00%	99.27%	97.56%	96.55%	94.91%	93.45%
	2	100.00%	100.00%	99.57%	99.84%	98.50%	97.25%
	Média	100.00%	99.64%	98.56%	98.19%	96.70%	95.35%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

- Viga L4

Vibrações de impacto

Tabela 19 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL4 p/ vibração de impacto

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	98.90%	97.25%	97.08%	94.52%	93.60%
	2	100.00%	99.51%	99.25%	98.08%	97.89%	97.84%
	Média	100.00%	99.20%	98.25%	97.58%	96.20%	95.72%
M2=1/4	1	100.00%	98.68%	96.36%	95.26%	94.34%	94.34%
	2	100.00%	98.68%	96.36%	95.26%	94.34%	94.34%
	Média	100.00%	98.68%	96.36%	95.26%	94.34%	94.34%
M3=3/8	1	100.00%	97.94%	97.39%	95.55%	95.55%	95.20%
	2	100.00%	98.16%	98.99%	98.66%	97.52%	96.71%
	Média	100.00%	98.05%	98.19%	97.10%	96.53%	95.96%
M4=1/2	1	100.00%	100.00%	99.08%	97.44%	96.71%	96.32%
	2	100.00%	100.00%	99.57%	98.97%	98.50%	97.25%
	Média	100.00%	100.00%	99.33%	98.21%	97.60%	96.79%

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

- Vibrações de base

Tabela 20 – Média dos valores relativos das duas primeiras frequências naturais em função da magnitude de dados – Viga VL4 p/ vibração de base

Posição dos Acelerômetros	Modos	Frequências Naturais					
		0	2.25%	8.15%	16.30%	21.36%	24.45%
M1=1/8	1	100.00%	98.37%	98.39%	97.65%	97.47%	96.92%
	2	100.00%	99.53%	97.93%	95.82%	94.72%	94.39%
	Média	100.00%	98.95%	98.16%	96.74%	96.09%	95.66%
M2=1/4	1	100.00%	100.00%	97.98%	97.62%	96.33%	95.25%
	2	100.00%	100.00%	97.98%	97.62%	96.33%	95.25%
	Média	100.00%	100.00%	97.98%	97.62%	96.33%	95.25%
M3=3/8	1	100.00%	100.00%	98.36%	95.08%	94.92%	94.36%
	2	100.00%	99.23%	98.99%	98.66%	98.76%	97.57%
	Média	100.00%	99.62%	98.68%	96.87%	96.84%	95.97%
M4=1/2	1	100.00%	99.81%	98.74%	99.63%	96.75%	95.47%
	2	100.00%	100.00%	99.74%	98.84%	98.67%	97.42%
	Média	100.00%	99.91%	99.24%	99.23%	97.71%	96.44%

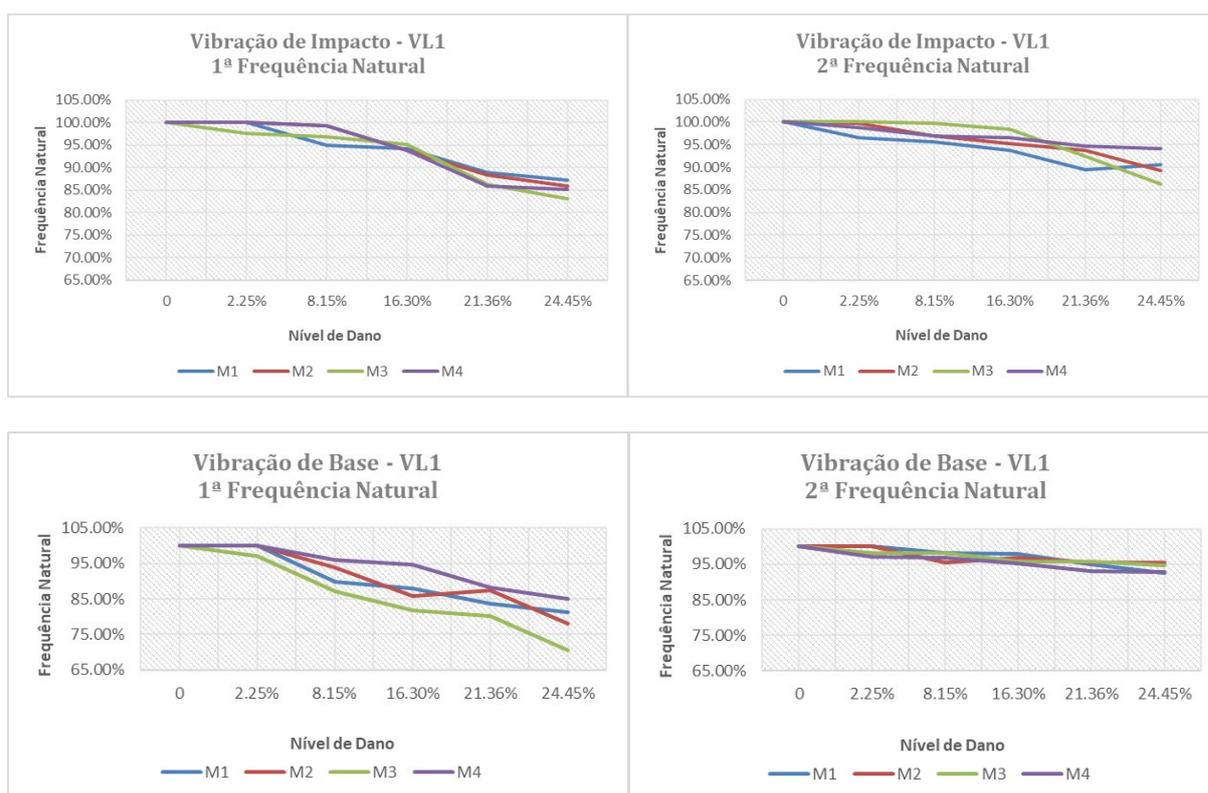
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

5.1 POSIÇÃO DO ACELERÔMETRO

A partir da análise dos gráficos pode-se concluir que a posição do acelerômetro não influenciou significativamente os resultados, de modo que para todas as posições (M1, M2, M3 e M4) é possível avaliar o decaimento das frequências naturais. Alguns poucos pontos destoaram da tendência da diminuição da frequência natural o que indica a presença de ruídos nas medições, como explicado acima.

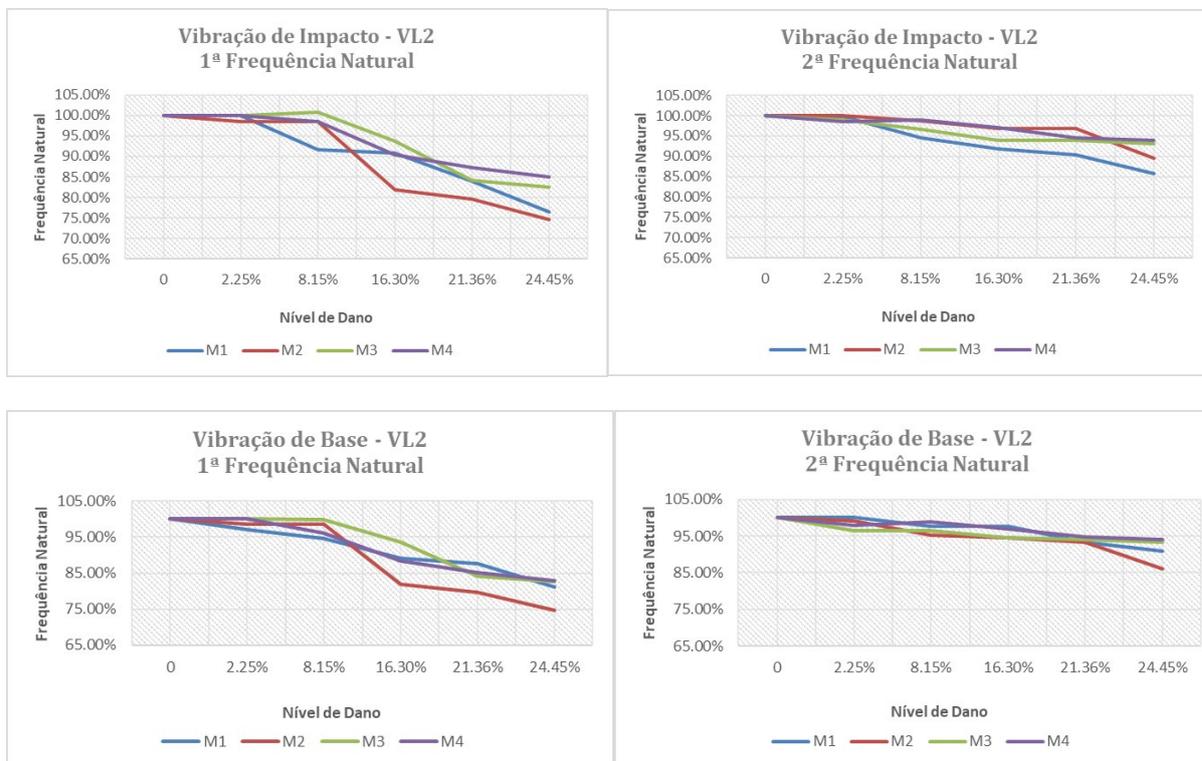
Para as vigas L1 e L2, as frequências encontradas nas diferentes posições destoaram mais que as vigas L3 e L4. Dessa forma, conclui-se que para um comprimento menor da viga, menor também é a influência da posição de medição no ensaio.

Gráfico 1 – Redução das frequências naturais para Viga L1 nas diferentes posições M1,M2, M3 e M4



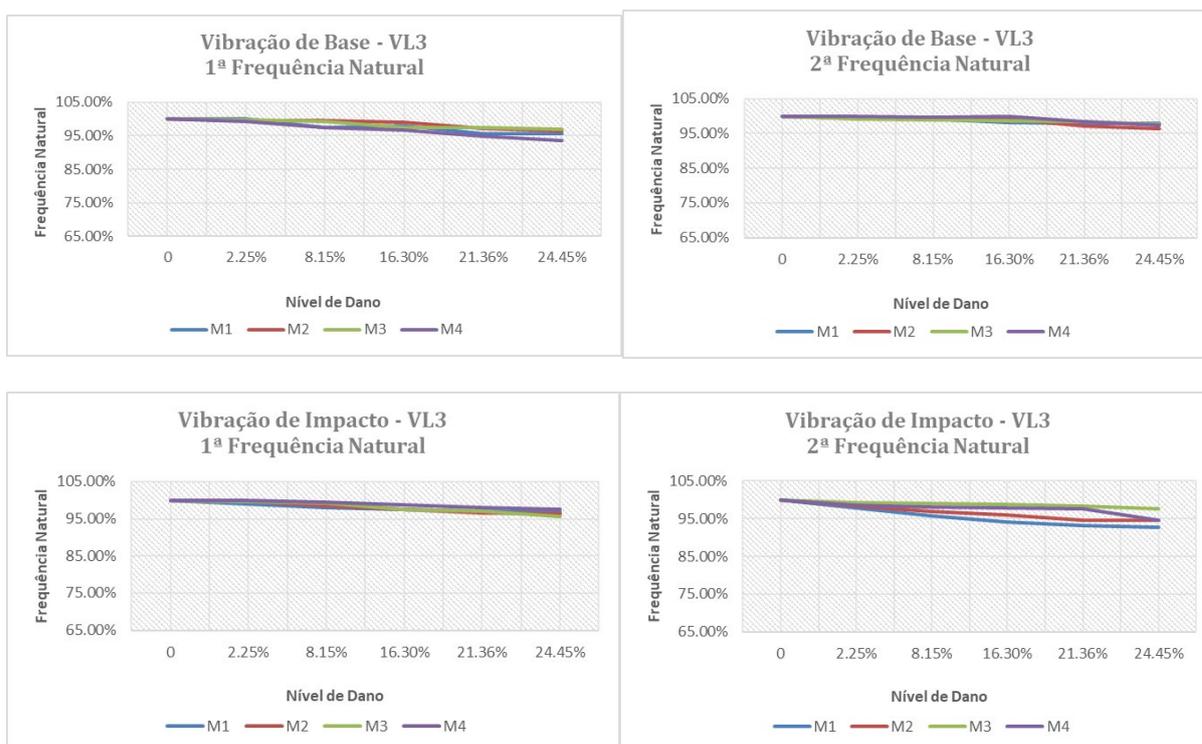
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 2 - Redução das frequências naturais para Viga L2 nas diferentes posições M1,M2, M3 e M4



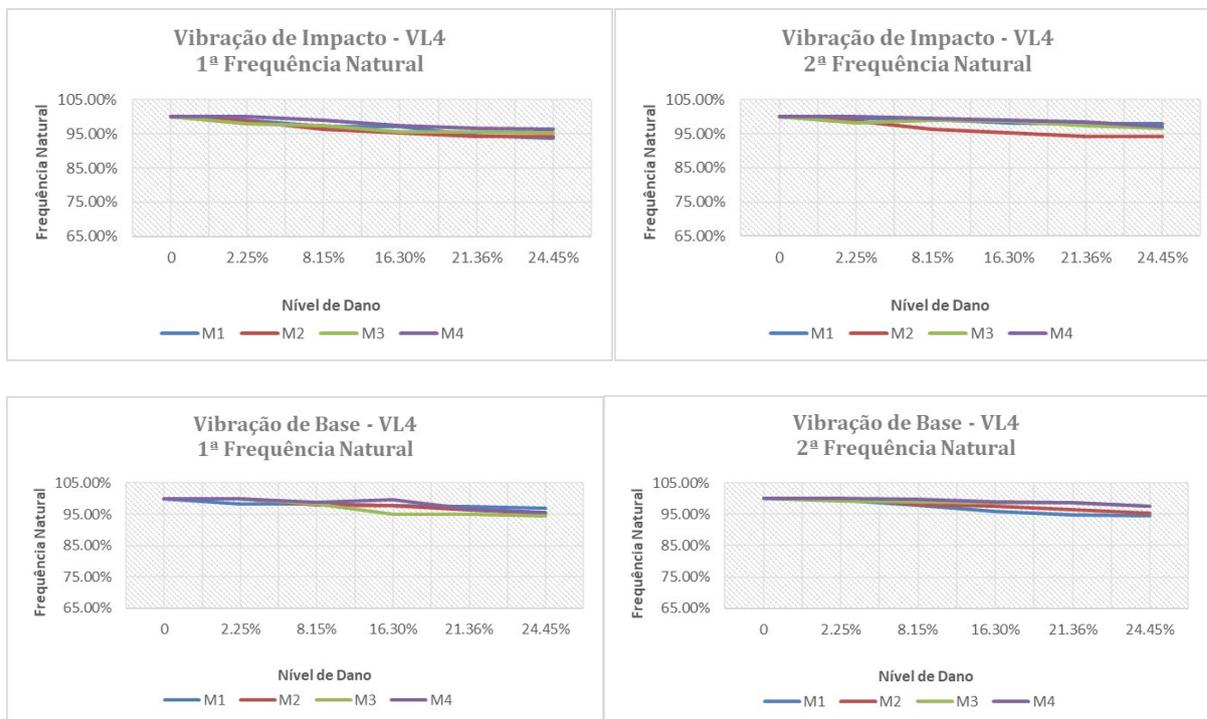
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 3 – Redução das frequências naturais para Viga L3 nas diferentes posições M1,M2, M3 e M4



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 4 – Redução das frequências naturais para Viga L4 nas diferentes posições M1, M2, M3 e M4

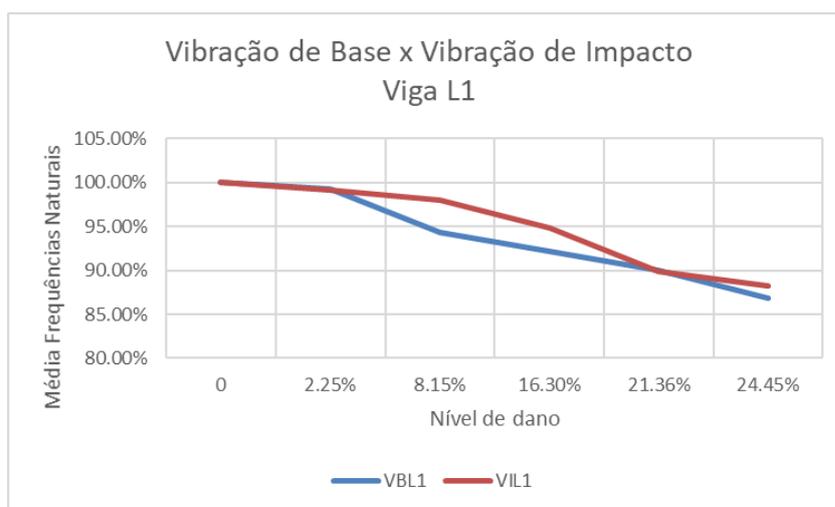


Fonte: Elaborado pela autora (2020)

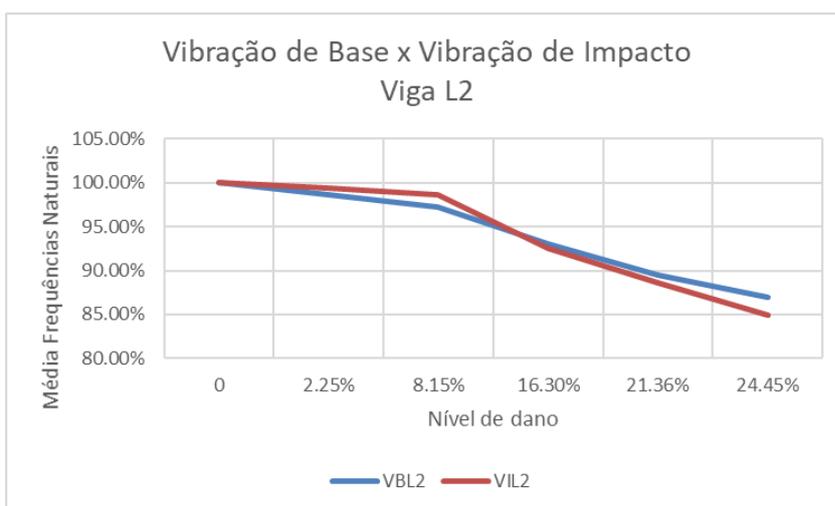
5.2 TIPO DE VIBRAÇÃO

Os gráficos de 5 a 8 analisam a influência do tipo de vibração, seja ela de base ou impacto, nos resultados obtidos. Para realização dos gráficos e melhor visualização dos resultados, foi considerado a média das duas frequências naturais encontradas para cada posição e a respectiva média dos valores encontrados entre as posições M1, M2, M3 e M4.

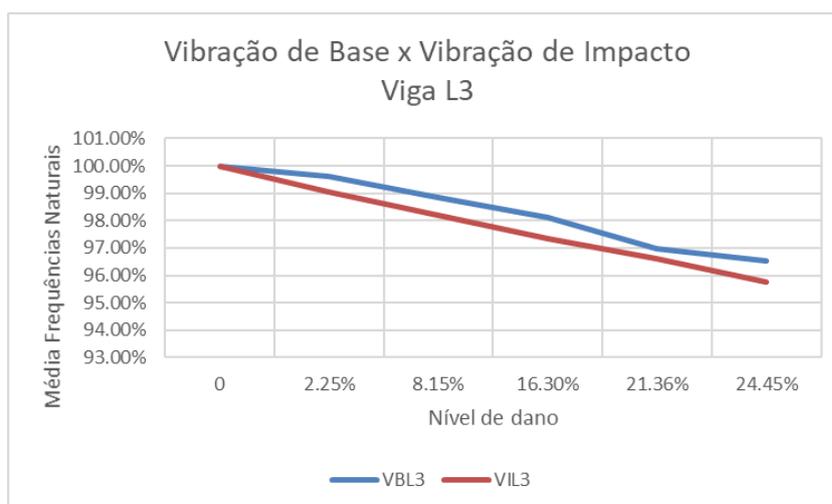
Os resultados obtidos não se distinguem significativamente, apesar dos valores absolutos serem diferentes. Isso demonstra que a realização de apenas um deles seria suficiente para a obtenção de resultados semelhantes. Além disso mostra o potencial das vibrações de base serem utilizadas nos ensaios de campo, já que apresentam as vantagens de não ser necessário interdição da estrutura e utilizarem as vibrações próprias do ambiente.

Gráfico 5 – Vibração de base x Vibração de impacto para viga L1

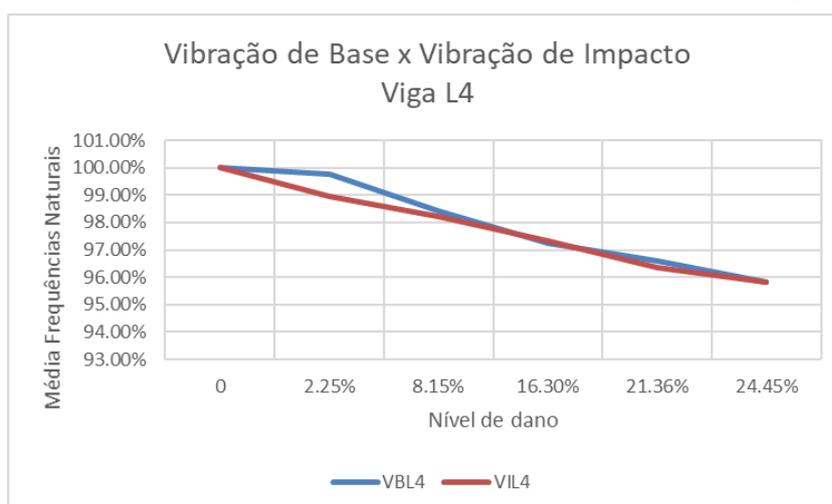
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 6 - Vibração de base x Vibração de impacto para viga L2

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 7 - Vibração de base x Vibração de impacto para viga L3

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 8 - Vibração de base x Vibração de impacto para viga L4

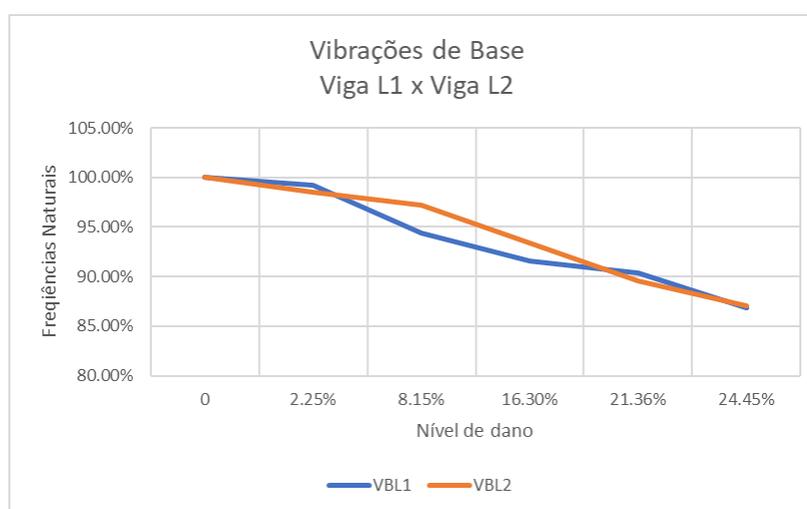
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

5.3 LOCALIZAÇÃO DO DANO

Duas posições de cortes foram consideradas ao realizar os ensaios experimentais. Para as vigas L1 e L3 os cortes foram feitos no meio da viga e nas vigas L2 e L4 a $\frac{1}{4}$ da viga da extremidade da viga. O intuito foi comparar as vigas com comprimentos semelhantes e posições de corte diferentes, ou seja, L1xL2 e L3xL4. Assim como no item 5.2, para melhor visualização dos resultados, foi considerado a média das duas frequências naturais encontradas para cada posição e a respectiva média dos valores encontrados entre as posições M1, M2, M3 e M4.

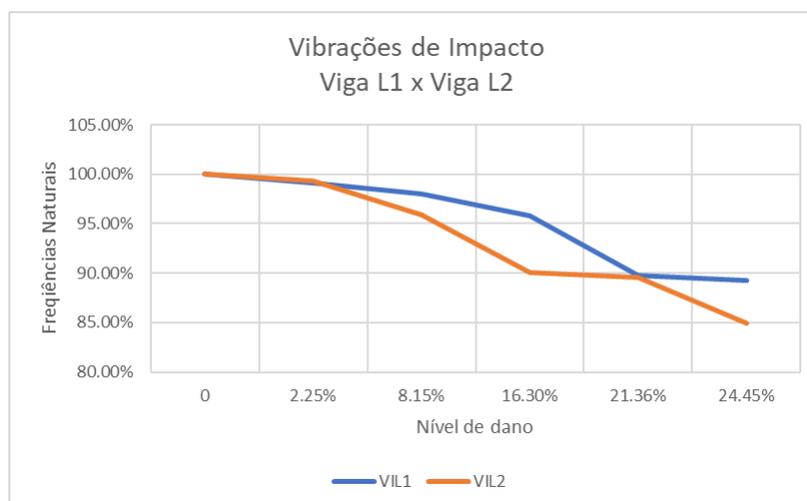
Analisando os gráficos 9 a 12 é possível ver que para as vigas L3 e L4 essa diferenciação nos resultados entre as posições foi praticamente inexistente. Para as vigas L1 e L2, ocorreu uma diferença nos valores principalmente para 8,15 e 16,30% de danos. Essa diferença pode ser justificada pelo fato das vigas serem maiores, apresentando uma menor rigidez, sendo mais fácil detectar alterações de danificações e possíveis variações. Mas essas diferenças não impactaram na tendência de diminuição da frequência.

Gráfico 9 – Redução nas frequências naturais para vibrações de base avaliando a posição do dano – L1XL2



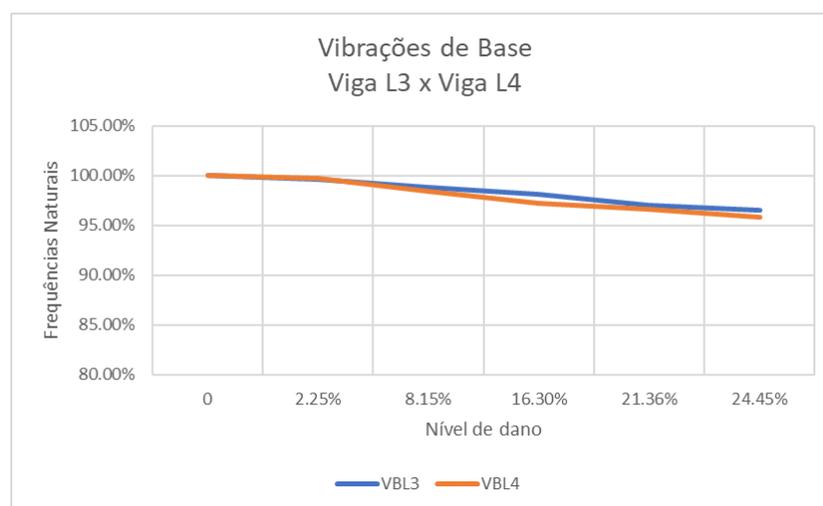
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 10 – Redução nas frequências naturais para vibrações de impacto avaliando a posição do dano – L1XL2



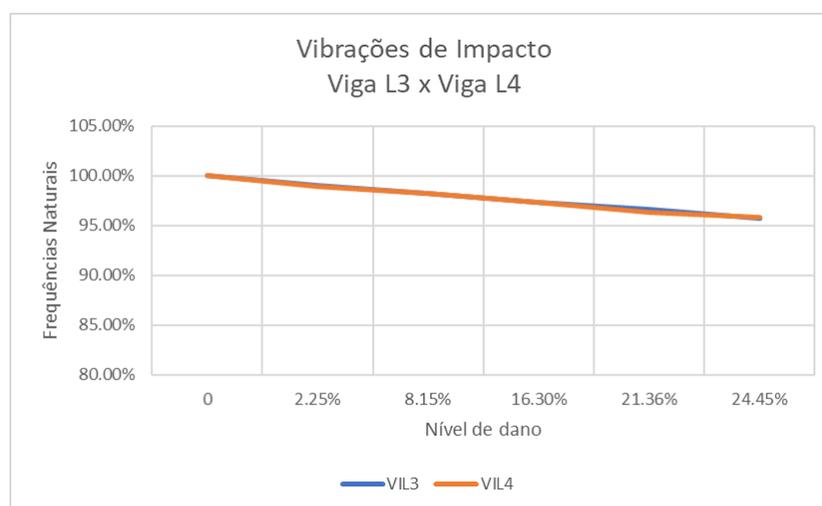
Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 11 - Redução nas frequências naturais para vibrações de base avaliando a posição do dano – L3XL4



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Gráfico 12 - Redução nas frequências naturais para vibrações de impacto avaliando a posição do dano – L3XL4



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

5.4 SENSIBILIDADE DA TÉCNICA

O objetivo principal do trabalho é avaliar a sensibilidade da técnica na detecção de pequenos danos. Pela análise dos gráficos e dos valores de frequências naturais

obtidos verifica-se que para o caso de 2,25% de danos os valores da frequência natural permanecem o mesmo para praticamente todos os ensaios, tendo uma ligeira diminuição em poucos casos. Já para o nível de danos de 8,15% já é possível notar diminuição da frequência natural da ordem de 3 a 10%, a depender do tipo de viga.

Outro fato importante analisado é que os decréscimos na frequência natural variaram na ordem de até 30% para o nível final de danos introduzido no caso das vigas L1 e L2. Já para as vigas L3 e L4 essa variação não é mais que 7% para o nível final. As rigidezes das vigas variam de forma proporcional a EI/L^3 . Então, quanto menor seu comprimento, maior sua rigidez. Para o caso deste estudo foi possível constatar que no caso das vigas com maiores rigidezes, as variações das frequências naturais foram menores ao longo da introdução dos danos, sendo mais difícil detectar prováveis danos.

6. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a sensibilidade das frequências naturais a partir da técnica FDD na identificação de pequenos possíveis danos devido a reduções da seção transversal de vigas de aço. Para isto foram realizadas medições em quatro vigas de aço utilizando vibrações aleatórias e de impacto. As medições foram realizadas utilizando uma taxa de aquisição de 800Hz e duração de 255 segundos para cada ensaio. Os dados obtidos foram então processados por um software desenvolvido em Fortran para obtenção dos parâmetros modais das vigas avaliadas.

Diante das análises foi possível concluir que houve uma diminuição das frequências naturais, mesmo que de forma sutil em alguns casos, em todos os ensaios realizados. O estudo também evidenciou que a forma de excitação da estrutura, neste caso, seja ela por vibrações de impacto ou por vibrações de base apresentou resultados bastantes semelhantes. Quanto a posição do acelerômetro e a posição do corte nas vigas, as diferentes posições não influenciaram significativamente os resultados referentes a variação das frequências naturais, de modo que em todas foi possível avaliar seu decaimento. Para o caso das vigas L3 e L4 essa variação foi menor.

A partir dos 196 ensaios realizados nas quatro vigas ensaiadas, conclui-se que este ensaio simplificado considerando apenas um ponto de medição e utilizando ações aleatórias associado à técnica de identificação estocástica FDD, consegue identificar na maioria dos casos alterações na frequência natural na ordem de 25%. A partir do nível de danos de 8,15% já é possível perceber alterações. Com isso, é possível concluir que a utilização da frequência natural como indicador de dano obtidos a partir das respostas dinâmicas possibilita a detecção de danos de forma rápida e com a utilização de poucos sensores.

Para trabalhos futuros, aconselha-se a elaboração de um modelo numérico em software apropriado, visando representar as vigas ensaiadas em laboratório com a simulação dos danos. Com o alcance dos parâmetros modais numéricos é possível realizar a calibração do modelo numérico para que os danos possam ser modelados e utilizados em conjunto com algoritmos de otimização para que se possa chegar aos

outros níveis de classificação segundo Ritter (Nível 2, 3 e 4). Outro ponto importante a ser avaliado em estudos posteriores é a realização de um menor número de ensaios, mas com a repetição dos mesmos nos pontos de análise para uma validação estatística e reforço da confiabilidade da técnica.

REFERÊNCIAS

ALVES, Vinicius Nicchio. Técnicas de anormalidade aplicadas à detecção de danos estruturais. p. 167, 2016. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7244>>.

BARBOSA, Flávio de Souza; BORGES, Carlos Cristiano Hasenclever; CURY, Alexandre Abrahão. Modelo de identificação de dano estrutural baseado na variação das características modais. Proceedings of the XXXI CILAMCE, 2010.

BAYRAKTAR, A. ALTUNIŞIC, A. C. SEVIN, B. TÜRKER, T. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge. Journal of Nondestructive Evaluation, v. 29, p. 14-24, Janeiro 2010.

BRANDT, Anders. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2011.

BRINCKER, R; ZHANG, L; ANDERSEN, P. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. Smart materials and structures, v. 10, n. 3, p. 441, 2001.

BRINCKER, Rune; VENTURA, Carlos E. *Introduction to Operational Modal Analysis*. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2015. v. 6.

CARDOSO, Cleverson Gomes. Identificação de danos em estruturas de viga por meio das suas propriedades dinâmicas. 2005.

CAWLEY, P.; ADAMS, R. D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 14, n. 2, p. 49–57, 1979.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamic of structures. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 1995.

CUNHA, Álvaro; CAETANO, Elsa. Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures. *Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures*, v. 40, n. 6, p. 603–604, 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1->

4020-6239-1_299>.

CUNHA, Álvaro; CAETANO, Elsa. Reanalyse dos ensaios dinâmicos da Ponte Vasco da Gama com base no método de identificação estocástica por sub-espacos. 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica, n. August 2014, p. 10, 2004. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Sismica_2004/747-756_c35_Álvaro_Cunha_10p_.pdf>.

DOEBLING, Scott W.; FARRAR, Charles R.; PRIME, Michael B. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and Vibration Digest*, v. 30, n. 2, p. 91–105, 1998.

ELSHAFEY, Ahmed A.; MARZOUK, H.; HADDARA, M. R. Experimental damage identification using modified mode shape difference. *Journal of Marine Science and Application*, v. 10, n. 2, p. 150–155, 2011.

FAN, Wei; QIAO, Pizhong. Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, v. 10, n. 1, p. 83–111, 2011.

FARRAR, CHARLES R.; KEITH, WORDEN. Introduction to Structural Health Monitoring. *Philosophical transactions of the royal society*, p. 1–17, 19 nov. 2007. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9780470517819.ch1>>. Acesso em: 6 maio 2019.

FARRAR, CR; DOEBLING, SW. An overview of modal-based damage identification methods. *EUROMECH 365 International Workshop: DAMAS 97, Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures*, v. 111, p. 270–78, 1997. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:AN+OVERVIEW+OF+MODAL-BASED+DAMAGE+IDENTIFICATION+METHODS#0>>.

FRISWELL, M. I.; PENNY, J. E.T. Crack modeling for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, v. 1, n. 2, p. 139–148, 2002.

GARESCÌ, F.; CATALANO, L.; PETRONE, F. Experimental results of a damage detection methodology using variations in modal parameters. *Experimental*

Mechanics, v. 46, n. 4, p. 441–451, 2006.

KOH, B.H.; DYKE, S.J. Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data. *Computers & Structures*, v. 85, n. 3–4, p. 117–130, fev. 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794906003063>>. Acesso em: 6 maio 2019.

MOSALLAM, Ayman *et al.* Health monitoring of a steel moment-resisting frame subjected to seismic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 140, p. 34–46, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X17311173>>. Acesso em: 6 maio 2019.

OWOLABI, G. M.; SWAMIDAS, A. S.J.; SESHADRI, R. Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions. *Journal of Sound and Vibration*, v. 265, n. 1, p. 1–22, 2003.

PANDEY, A. K.; BISWAS, M. *Damage detection in structures using changes in flexibility*. *Journal of Sound and Vibration*. [S.l.: s.n.], 1994

PEETERS, Bart; DE ROECK, Guido. Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v. 123, n. 4, p. 659, 2001. Disponível em: <<http://dynamicsystems.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1409239>>.

RAINIERI, Carlo; FABBROCINO, Giovanni. *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*. Springer, New York, v. 142, p. 322, 2014.

RITTER. Aalborg Universitet Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures Rytter, Anders. 1993.

RODRÍGUEZ, Ramsés; ESCOBAR, J. Alberto; GÓMEZ, Roberto. Damage detection in instrumented structures without baseline modal parameters. *Engineering Structures*, v. 32, n. 6, p. 1715–1722, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.021>>.

SALAWU, O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, v. 10, n. 6, p. 1069–1073, 1997.

SYSCOM INSTRUMENTS. Catálogo de Especificações Técnicas SYSCOM MS2005+. Sainte-Croix, [2014]. Disponível em: <https://bartec.de/ProdCatalogue/Assets/Datasheets/Ing_0/BARTEC-SYSCOM-MS2005plus_1E.pdf>. Acesso em 05 fev.2020.

TECHNOLOGIES, Agilent. The Fundamentals of Signal Analysis. Application Note 243. *Agilent Technologies*, p. 68, 2000.

TIACHACHT, S; BOUAZZOUNI, A; KHATIR, S.; WAHAB, M; BEHTANI, A; CAPOZUCCA, R. Damage assessment in structures using combination of a modified Cornwell indicator and genetic algorithm. *Engineering Structures*, v. 177, p. 421–430, dez. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029618317620>>. Acesso em: 6 maio 2019.

URSOS, Michael Edward; TINGATINGA, Eric Augustus; LONGALONG, Romeo Eliezer. A finite element based method for estimating natural frequencies of locally damaged homogeneous beams. *Procedia Engineering*, v. 199, p. 404–410, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.131>>.

ZHOU, Zhengjie. *Vibration-based damage detection of bridge superstructures. A Tool for Structural Health Monitoring*. ISBN: 978-3-639-09337-7, 2008.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA ACELERÔMETRO

Figura 15 - Especificações técnicas MS2005

Technical specification		
Acceleration Sensing Element Principle		
The sensing element is an analog force feedback accelerometer featuring a variable capacitance, silicon bulk-micromachined acceleration sensor (MEMS) and a custom low-power mixed-signal integrated circuit (ASIC). The MEMS/ASIC custom design forms a DC coupled analog servo accelerometer.		
Hysteresis	None	
Noise	typ. 900 ng rms/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (10 - 1000 Hz)	
Natural frequency	Frequency response DC to >10000 Hz	
Shock survival	1500 g (0.5 ms half sine)	
Vibration survival	60 g (20-2000 Hz, peak-peak)	
Operating temperature	-40 to +85 °C	
Housing	Aluminium, 85 x 75 x 58 mm (W x L x H) optional : Stainless Steel, 100 x 100 x 66 mm, with mounting platform, 140 x 100 x 10 mm	
Protection	IP 65 (splash proof)	
MS2005+ triaxial sensor		
Measuring range	± 4 g standard or ± 2 g	
Scale factor temp. drift (± 4 g)	typ. <100 ppm/°C	
Zero point offset drift (± 4 g)	typ. <600 $\mu\text{g}/^\circ\text{C}$	
Orientation	Triaxial, horizontal (floor) mounting or vertical (wall) mounting	
Non-Linearity	<1.5 % of full scale	
Dynamic range (± 4 g)	typ. 110 dB (100 Hz BW)	
Supply voltage	± 6.5 V to ± 12 V	
Current consumption	typ. 45 mA	
Output voltage	± 4 V single-ended, optional ± 4 V differential	
Self-test	Test-pulse	
Cross axis rejection	>40 dB	
Weight	0.5 kg	
Connection	Metallic self latching push-pull LEMO connector	
Ordering information		
MS2005+ triaxial Horizontal mounting	2 g FS	14114002
MS2005+ triaxial Horizontal mounting	4 g FS	14114004
MS2005+ triaxial Vertical mounting	2 g FS	14114012
MS2005+ triaxial Vertical mounting	4 g FS	14114014
MS2005+ uniaxial Horizontal mounting, horizontal axis	4 g FS	14114024
MS2005+ uniaxial horizontal mounting, vertical axis	2 g FS	14114032
MS2005+ uniaxial Horizontal mounting, vertical axis	4 g FS	14114034
MS2005+ triaxial Horizontal mounting, Stainless Steel	2 g FS	14114302



MS2005+ aluminium housing

Fonte: Adaptado SYCOM (2014)

ANEXO B – PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Tabela 21 - Vibrações de base realizadas nas vigas

VIBRAÇÕES DE BASE														
Comp. total da viga	Dano (Posição)	Posição do acelerômetro	Sem danos	Temp	D1=2,25%	Temp	D2=8,15%	Temp	D3=16,3%	Temp	D4=21,36%	Temp	D5=24,45%	Temp
L1=3,02m	P1=1/2	M1=1/8	VBL1POM1D0	25.5°	VBL1P1M1D1	26°	VBL1P1M1D2	26.5°	VBL1P1M1D3	26°	VBL1P1M1D4	26.5	VBL1P1M1D5	26°
		M2=1/4	VBL1POM2D0	26°	VBL1P1M2D1	26°	VBL1P1M2D2	26.5°	VBL1P1M2D3	26.5°	VBL1P1M2D4	26.5	VBL1P1M2D5	26°
		M3=3/8	VBL1POM3D0	26°	VBL1P1M3D1	26°	VBL1P1M3D2	26.5°	VBL1P1M3D3	26.5°	VBL1P1M3D4	26.5	VBL1P1M3D5	26.5°
		M4=1/2	VBL1POM4D0	26°	VBL1P1M4D1	26.5°	VBL1P1M4D2	27°	VBL1P1M4D3	27°	VBL1P1M4D4	27.0°	VBL1P1M4D5	26.5°
L2=3,038m	P2=1/4	M1=1/8	VBL2POM1D0	26.5°	VBL2P2M1D1	26.5°	VBL2P2M1D2	27°	VBL2P2M1D3	27°	VBL2P2M1D4	27°	VBL2P2M1D5	26°
		M2=1/4	VBL2POM2D0	26.5°	VBL2P2M2D1	26°	VBL2P2M2D2	27°	VBL2P2M2D3	27°	VBL2P2M2D4	27°	VBL2P2M2D5	26°
		M3=3/8	VBL2POM3D0	26.5°	VBL2P2M3D1	26.5°	VBL2P2M3D2	27°	VBL2P2M3D3	27°	VBL2P2M3D4	27°	VBL2P2M3D5	26°
		M4=1/2	VBL2POM4D0	25.5°	VBL2P2M4D1	26.5°	VBL2P2M4D2	27.5°	VBL2P2M4D3	27.5°	VBL2P2M4D4	27°	VBL2P2M4D5	26.5°
L3=1,50m	P1=1/2	M1=1/8	VBL3POM1D0	26°	VBL3P1M1D1	26°	VBL3P1M1D2	26.5°	VBL3P1M1D3	26.5°	VBL3P1M1D4	27°	VBL3P1M1D5	26.5°
		M2=1/4	VBL3POM2D0	26°	VBL3P1M2D1	26°	VBL3P1M2D2	26.5°	VBL3P1M2D3	26.5°	VBL3P1M2D4	27°	VBL3P1M2D5	26.5°
		M3=3/8	VBL3POM3D0	26.5°	VBL3P1M3D1	26°	VBL3P1M3D2	26.5°	VBL3P1M3D3	26.5°	VBL3P1M3D4	27.5°	VBL3P1M3D5	26.5°
		M4=1/2	VBL3POM4D0	26.5°	VBL3P1M4D1	26.5°	VBL3P1M4D2	26.5°	VBL3P1M4D3	27°	VBL3P1M4D4	27.5°	VBL3P1M4D5	27°
L4=1,51m	P2=1/4	M1=1/8	VBL4POM1D0	26°	VBL4P2M1D1	26°	VBL4P2M1D2	26.5°	VBL4P2M1D3	26°	VBL4P2M1D4	26°	VBL4P2M1D5	26.5°
		M2=1/4	VBL4POM2D0	26°	VBL4P2M2D1	26°	VBL4P2M2D2	26.5°	VBL4P2M2D3	26°	VBL4P2M2D4	26°	VBL4P2M2D5	26.5°
		M3=3/8	VBL4POM3D0	26°	VBL4P2M3D1	26°	VBL4P2M3D2	26.5°	VBL4P2M3D3	26°	VBL4P2M3D4	26°	VBL4P2M3D5	26.5°
		M4=1/2	VBL4POM4D0	26°	VBL4P2M4D1	26.5°	VBL4P2M4D2	26.5°	VBL4P2M4D3	26.5°	VBL4P2M4D4	25°	VBL4P2M4D5	26.5°

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Nomenclatura dos arquivos:	VXLAPBMCD
X=B	Vibração de base
X=I	Vibração impulsiva

Tabela 22 - Vibrações impulsivas realizadas nas vigas

VIBRAÇÕES IMPULSIVAS														
Comp. total da viga	Dano (Posição)	Posição do acelerômetro	Sem danos	Temp	D1=2,25%	Temp	D2=8,15%	Temp	D3=16,3%	Temp	D4=21,36%	Temp	D5=24,45%	Temp
L1=3,02m	P1=1/2	M1=1/8	VIL1POM1D0	25.5°	VIL1P1M1D1	26°	VIL1P1M1D2	26.5°	VIL1P1M1D3	26°	VIL1P1M1D4	26.5	VIL1P1M1D5	26°
		M2=1/4	VIL1POM2D0	26°	VIL1P1M2D1	26°	VIL1P1M2D2	26.5°	VIL1P1M2D3	26.5°	VIL1P1M2D4	26.5	VIL1P1M2D5	26°
		M3=3/8	VIL1POM3D0	26°	VIL1P1M3D1	26°	VIL1P1M3D2	26.5°	VIL1P1M3D3	26.5°	VIL1P1M3D4	26.5	VIL1P1M3D5	26.5°
		M4=1/2	VIL1POM4D0	26°	VIL1P1M4D1	26.5°	VIL1P1M4D2	27°	VIL1P1M4D3	27°	VIL1P1M4D4	27.0°	VIL1P1M4D5	26.5°
L2=3,038m	P2=1/4	M1=1/8	VIL2POM1D0	26.5°	VIL2P2M1D1	26.5°	VIL2P2M1D2	27°	VIL2P2M1D3	27°	VIL2P2M1D4	27°	VIL2P2M1D5	26°
		M2=1/4	VIL2POM2D0	26.5°	VIL2P2M2D1	26°	VIL2P2M2D2	27°	VIL2P2M2D3	27°	VIL2P2M2D4	27°	VIL2P2M2D5	26°
		M3=3/8	VIL2POM3D0	26.5°	VIL2P2M3D1	26.5°	VIL2P2M3D2	27°	VIL2P2M3D3	27°	VIL2P2M3D4	27°	VIL2P2M3D5	26°
		M4=1/2	VIL2POM4D0	25.5°	VIL2P2M4D1	26.5°	VIL2P2M4D2	27.5°	VIL2P2M4D3	27.5°	VIL2P2M4D4	27°	VIL2P2M4D5	26.5°
L3=1,50m	P1=1/2	M1=1/8	VIL3POM1D0	26°	VIL3P1M1D1	26°	VIL3P1M1D2	26.5°	VIL3P1M1D3	26.5°	VIL3P1M1D4	27°	VIL3P1M1D5	26.5°
		M2=1/4	VIL3POM2D0	26°	VIL3P1M2D1	26°	VIL3P1M2D2	26.5°	VIL3P1M2D3	26.5°	VIL3P1M2D4	27°	VIL3P1M2D5	26.5°
		M3=3/8	VIL3POM3D0	26.5°	VIL3P1M3D1	26°	VIL3P1M3D2	26.5°	VIL3P1M3D3	26.5°	VIL3P1M3D4	27.5°	VIL3P1M3D5	26.5°
		M4=1/2	VIL3POM4D0	26.5°	VIL3P1M4D1	26.5°	VIL3P1M4D2	26.5°	VIL3P1M4D3	27°	VIL3P1M4D4	27.5°	VIL3P1M4D5	27°
L4=1,51m	P2=1/4	M1=1/8	VIL4POM1D0	26°	VIL4P2M1D1	26°	VIL4P2M1D2	26.5°	VIL4P2M1D3	26°	VIL4P2M1D4	26°	VIL4P2M1D5	26.5°
		M2=1/4	VIL4POM2D0	26°	VIL4P2M2D1	26°	VIL4P2M2D2	26.5°	VIL4P2M2D3	26°	VIL4P2M2D4	26°	VIL4P2M2D5	26.5°
		M3=3/8	VIL4POM3D0	26°	VIL4P2M3D1	26°	VIL4P2M3D2	26.5°	VIL4P2M3D3	26°	VIL4P2M3D4	26°	VIL4P2M3D5	26.5°
		M4=1/2	VIL4POM4D0	26°	VIL4P2M4D1	26.5°	VIL4P2M4D2	26.5°	VIL4P2M4D3	26.5°	VIL4P2M4D4	25°	VIL4P2M4D5	26.5°

Fonte: Elaborado pela autora (2019)

Nomenclatura dos arquivos:	VXLAPBMCDD
X=B	Vibração de base
X=I	Vibração impulsiva