



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura  
Engenharia Civil de Infraestrutura

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DANO NO AMORTECIMENTO DO CONCRETO**

PABLO ARIEL RAMIREZ NUÑEZ

Foz do Iguaçu, PR  
Dezembro de 2020



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura  
Engenharia Civil de Infraestrutura

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DANO NO AMORTECIMENTO DO CONCRETO**

PABLO ARIEL RAMIREZ NUÑEZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Iván Dario Gómez Araújo

Foz do Iguaçu, PR  
Dezembro de 2020



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA



### ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) dia(s) 21 do mês de Dezembro do ano de 2020 realizou-se a apresentação pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso, intitulado ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DANO NO AMORTECIMENTO DO CONCRETO

apresentado pelo discente Pablo Ariel Ramirez Nuñez, do curso Engenharia Civil de Infraestrutura. Os trabalhos foram iniciados às 10 h 00, pelo(a) docente orientador(a) Iván Dario Gómez Araújo

presidente da banca examinadora, juntamente com o(a) docente Ulises Bobadilla Guadalupe, e o(a) docente César Winter de Mello.

#### Observações da Banca Examinadora:

Por unanimidade foi considerada a nota máxima na avaliação, foram recomendadas algumas correções ao texto

A Banca Examinadora, ao término da apresentação oral e da arguição do acadêmico, encerrou os trabalhos às 11 h 30. Os examinadores atribuíram as seguintes notas:

orientador(a)	nota final: 10.0	Média final:  <u>10.0</u>
docente	nota final: 10.0	
docente	nota final: 10.0	

Proclamado o resultado pelo presidente da banca examinadora, encerraram-se os trabalhos e, para constar, eu Iván Dario Gómez Araújo lavrei a presente Ata que assino juntamente com os demais membros da banca.

Foz do Iguaçu, 21 de Dezembro de 2020.

Assinaturas:

		<u>Ivan Gomez Araujo</u>
--	--	--------------------------

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho,  
Aos meus avós maternos e paternos.  
Ao meu pai, à minha mãe e família.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me ajudado a alcançar mais um objetivo, por renovar minhas forças a cada dia, por me acompanhar a cada passo, e abençoar toda esta caminhada.

Aos meus pais, pelo amor e apoio constante aos meus projetos, minhas realizações também pertencem a eles, à minha irmã por sua paciência, à minha princesa e a toda minha família que sempre estão torcendo por mim.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, e especialmente àqueles que me ajudaram ainda mais na minha formação como pessoa. De forma muito especial, agradeço ao Professor Iván Dario Gómez Araújo, por ter aceitado me orientar, pela paciência e dedicação incansável, sempre exigindo o melhor de mim, sem sua orientação este trabalho não seria possível. À Professora Helenice Maria Sacht, pela ajuda prestada desde o início deste trabalho.

Aos meus colegas da faculdade, que se tornaram amigos para toda a vida, agradeço todo o apoio incondicional que vocês me deram ao longo desses anos.

Aos meus amigos do colégio, alguns já profissionais, mesmo à distância, sempre compartilhando minha felicidade e minhas conquistas.

A empresa Concret Max S.A., pelo fornecimento do material e informações pertinentes utilizados nesta pesquisa.

Ao Engenheiro Dario Franco, pela disponibilidade diária e auxílio brindado no Laboratório de Tecnologia do Concreto da empresa Hormipar S.A., para a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro José Alcaraz, serei eternamente grato por todos os ensinamentos e pela amizade construída.

## RESUMO

A vibração aleatória é uma das principais solicitações às quais muitas estruturas são submetidas. Conseqüentemente, a inspeção durante a manufatura das peças estruturais e vida útil ou de serviço, torna-se imprescindível por meio de ferramentas de diagnósticos econômicos e de fácil execução. Nesse sentido, as técnicas e metodologias convencionais de detecção de dano (por exemplo, métodos visuais de detecção) nem sempre são viáveis, motivo pelo qual buscam-se alternativas, especialmente em pequenas peças estruturais, onde há maior risco de falha. A avaliação da condição destas peças é realizada a partir da seleção de um indicador sensível à presença de qualquer variação no comportamento estrutural, assim, através do método de decremento randômico, é possível analisar a evolução do parâmetro dinâmico no tempo. Neste contexto, o método de decremento randômico em conjunto com o método de ajuste de curva para a estimação do parâmetro dinâmico, serão utilizados no presente trabalho para o estudo da influência do dano na taxa de amortecimento de corpos de prova cilíndricos de concreto, submetidos a três valores de carga de compressão uniaxial. Para este fim, foi desenvolvido por parte do autor em conjunto com o orientador, um programa em linguagem MATLAB® a fim de avaliar a sensibilidade do amortecimento ao dano, quando comparando-a as variações de frequências apresentadas no programa. Para tanto, os materiais foram caracterizados e foram realizados ensaios pela técnica de excitação por impulso, utilizando um equipamento também fabricado pelo autor em conjunto com o orientador deste trabalho. Os resultados numéricos obtidos no estado inicial não danificado foram comparados para os diferentes valores de carga aplicadas ao mesmo corpo de prova, gerando na etapa final um gráfico que relaciona a taxa de amortecimento com a amplitude de vibração. Assim, a taxa de amortecimento se apresenta como um indicador altamente sensível ao dano, especialmente em valores de carga menor a 50% da carga última de ruptura dos corpos de prova cilíndricos de concreto.

**Palavras-Chave:** Amortecimento; dano; concreto; decremento randômico; técnica de excitação por impulso.

## ABSTRACT

Random vibration is one of the main stresses to which many structures are subjected. Consequently, the inspection during the manufacture of the structural parts and the lifetime or service life, becomes indispensable by means of economical and easy to perform diagnostic tools. In this sense, conventional techniques and methodologies of damage detection (for example, visual detection methods) are not always feasible, which is why alternatives are sought, especially in small structural parts, where there is a higher risk of failure. The evaluation of the condition of these parts is carried out from the selection of an indicator sensitive to the presence of any variation in structural behavior, thus, through the random decrement technique, it is possible to analyze the evolution of the dynamic parameter over time. In this context, the random decrement technique together with the curve fitting method for the estimation of the dynamic parameter, will be used in the present work for the study of the influence of the damage on the damping rate of cylindrical concrete specimens, submitted to three values of uniaxial compression load. For this purpose, a program in MATLAB® language was developed by the author together with the supervisor in order to evaluate the sensitivity of the damping to damage, when comparing it to the frequency variations presented in the program. For this purpose, the materials were characterized and tests were performed by the impulse excitation technique, using an equipment also manufactured by the author together with the supervisor of this work. The numerical results obtained in the initial undamaged state were compared for the different load values applied to the same specimen, generating in the final stage a graph that relates the damping rate with the vibration amplitude. Thus, the damping rate is a highly sensitive indicator of damage, especially in load values less than 50% of the ultimate breaking load of cylindrical concrete specimens.

**Keywords:** Damping; damage; concrete; random decrement technique; impulse excitation technique.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Modelo idealizado do S1GL. (a) esquema. (b) diagrama do corpo livre. (c) representação do S1GL no plano s. ....	17
<b>Figura 2</b> – Vibrações aleatórias. (a) Conjunto de processos aleatórios. (b) Características da função de autocorrelação.....	22
<b>Figura 3</b> - Densidade espectral de um processo: (a) banda larga e (b) banda estreita.....	27
<b>Figura 4</b> – Representação do efeito de microfissuração em corpos de prova cilíndricos de concreto para: (a) 30% da tensão última; (b) 50% da tensão última; (c) 75% da tensão última. ....	30
<b>Figura 5</b> – Procedimento do MDR: (a) seleção dos segmentos de tempo da resposta ao processo $xt$ ; (b) o cálculo da média dos segmentos de tempo; (c) o sinal RD resultante do cálculo. ....	36
<b>Figura 6</b> – Resposta da vibração livre amortecida.....	37
<b>Figura 7</b> – Fluxograma da metodologia de trabalho. ....	41
<b>Figura 8</b> – Caracterização física dos corpos de prova de concreto: (a) pesagem do corpo de prova de concreto; (b) medição do diâmetro; (c) enumeração dos corpos de prova.....	42
<b>Figura 9</b> – Implementação computacional do método de decremento randômico em linguagem MATLAB®.....	44
<b>Figura 10</b> – Desenvolvimento da interface gráfica do programa UNILastic no GUIDE - MATLAB®.....	44
<b>Figura 11</b> – Ensaio pela TEI: (a) marcação dos nós de ressonância; (b) ajuste dos cabos de aço do suporte UNILastic; (c) posicionamento do microfone e o corpo de prova no suporte UNILastic; (d) aplicação da excitação com o DIML; (e) registro da resposta acústica por parte do módulo Damping Curve. ....	45
<b>Figura 12</b> – Tela principal do UNILastic. ....	47
<b>Figura 13</b> – Tela principal do UNILastic apresentando o som gravado. ....	48
<b>Figura 14</b> – Resultado obtido através do UNILastic, apresentando a densidade espectral da amostra ensaiada. ....	48
<b>Figura 15</b> – Resultados obtidos do módulo Damping Curve para traçar a curva de amortecimento versus amplitude da amostra ensaiada para o pico de frequência selecionado.....	49
<b>Figura 16</b> – Resultados da curva taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para diferentes pontos de excitação na frequência igual a 5859,4Hz: (a) golpes aleatórios na base; (b) golpes aleatórios na lateral; (c) golpes no centro da base.....	50
<b>Figura 17</b> – Resultados da curva taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para diferentes pontos de excitação na frequência igual a 9562,5Hz: (a) golpes aleatórios na base; (b) golpes aleatórios na lateral; (c) golpes no centro da base.....	50
<b>Figura 18</b> – Resultados da curva taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para diferentes tempos de gravação na frequência igual a 9562,5 Hz. (a) 10 segundos; (b) 30 segundos; (c) 50 segundos.....	51



<b>Figura 19</b> – Resultados da curva taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para diferentes tempos de gravação na frequência igual a 11016Hz. (a) 10 segundos; (b) 30 segundos; (c) 50 segundos. ....	51
<b>Figura 20</b> – Resultados da curva taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para diferentes tempos de gravação na frequência igual a 9656,3Hz. (a) seleção do pico de frequência; (b) definição do intervalo com o <i>slider</i> em relação a frequência selecionada. ....	52
<b>Figura 21</b> – Resultados das curvas representando a resposta livre do sistema pelo: (a) método do decremento logarítmico; (b) método de ajuste da curva. ....	52
<b>Figura 22</b> – Processo de danificação do corpo-de-prova: (a) disposição do prato de aço nas faces do corpo-de-prova; (b) equipamento MATEST para realização de ensaio de resistência a compressão; (c) centralização do corpo-de-prova dentro do equipamento; (d) configuração do equipamento MATEST para após finalizado o carregamento, salvar o registro de carga; (e) aplicação da carga em andamento. ...	53
<b>Figura 23</b> – Avaliação dos resultados com o aplicativo Curve Fitting Toolbox™ modificado: (a) exportação dos registros pertencentes as curvas geradas no módulo Damping Curve; (b) registro dos resultados do corpo de prova no Curve Fitting Toolbox™; (c) Seleção do nível de confiança igual a 95%; (d) código modificado do aplicativo Curve Fitting Toolbox™. ....	55
<b>Figura 24</b> – Registro dos valores de cargas aplicado ao: (a) corpo de prova 1; (b) corpo de prova 2; (c) corpo de prova 3. ....	57
<b>Figura 25</b> – Variação dos picos de frequências: (a) corpo de prova 1; (b) corpo de prova 2; (c) corpo de prova.....	58
<b>Figura 26</b> – Resultados das curvas taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para o corpo de prova 1: (a) 5906.3-100; (b) 9656,3-200; (c) 19313-200 .....	60
<b>Figura 27</b> – Resultados das curvas taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para o corpo de prova 2: (a) 5859.4-100; (b) 9562.5-300; (c) 19078-200. ....	62
<b>Figura 28</b> – Resultados das curvas taxa de amortecimento <i>versus</i> amplitude para o corpo de prova 3: (a) 5906,3-200; (b) 9562.5-200; (c) 19078-200. ....	63
<b>Figura 29</b> – Corpo de prova 1.....	64
<b>Figura 30</b> – Corpo de prova 2.....	64
<b>Figura 31</b> – Corpo de prova 3.....	64
<b>Figura 32</b> – Posição de roscas e furos nos perfis.....	76
<b>Figura 33</b> – Esqueleto lateral do suporte.....	77
<b>Figura 34</b> – Montagem do esqueleto .....	78
<b>Figura 35</b> – Montagem das barras de aço inox no esqueleto. ....	79
<b>Figura 36</b> – Finalização do suporte com os acabamentos .....	79

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Características físicas dos corpos de prova de concreto.....	42
<b>Tabela 2</b> – Variação percentual das frequências, conforme três valores de carga aplicados a cada corpo de prova respectivamente. ....	59
<b>Tabela 3</b> – Lista de cortes dos perfis, tiras de acabamento e barra de aço inox .....	76

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Modelos de amortecimento .....	32
<b>Quadro 2</b> – Técnicas de estimativa do amortecimento .....	33
<b>Quadro 3</b> – Condições de passagem de nível.....	35
<b>Quadro 4</b> – Domínios de aplicação e resultados do TEI .....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C°A°	Concreto armado
CpC°	Corpo de prova de concreto
DF	Domínio da frequência
DT	Domínio do tempo
END	Ensaio não destrutivo
FRF	Função resposta em frequência
FRI	Função resposta ao impulso
MDL	Método do decremento logarítmico
MDR	Método do decremento randômico
S1GL	Sistema de um grau de liberdade
SNGL	Sistema de n-graus de liberdade
TDF	Transformada discreta de Fourier
TEI	Técnica de excitação por impulso
$\mathcal{F}\{f\}$	Transformada de Fourier
$\mathcal{F}^{-1}\{f\}$	Transformada inversa de Fourier
$\mathcal{L}\{f(t)\}$	Transformada de Laplace
$\mathcal{L}^{-1}\{f(t)\}$	Transformada inversa de Laplace
DIML	Dispositivo de impulso manual leve
E	Módulo de elasticidade ou de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
$\nu$	Coeficiente de Poisson

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
2.1    Objetivo Geral.....	16
2.2    Objetivos Específicos.....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
3.1    Sistemas amortecidos de um grau de liberdade.....	17
<b>3.1.1 Solução para vibrações forçadas.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.2 Resposta ao impulso.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.3 Integral da convolução.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.4 Estatística de processos aleatórios.....</b>	<b>21</b>
3.2    Densidade espectral.....	23
<b>3.2.1 Estimação do espectro com dados.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.2 Correlação entre <math>H(\omega)</math> e <math>h(t)</math>.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.3 Ruído branco gaussiano.....</b>	<b>27</b>
3.3    Fundamentos da vibração aleatória.....	28
3.4    Comportamento mecânico no nível microscópico do concreto.....	29
3.5    Detecção de danos com base na análise do amortecimento.....	30
<b>3.5.1 Fundamentação teórica do amortecimento.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5.2 Modelos de amortecimento.....</b>	<b>32</b>
3.6    Técnicas de estimativa do amortecimento.....	33

3.6.1	<b>Método do Decremento Randômico (MDR)</b> .....	<b>34</b>
3.6.2	<b>Método do Decremento Logarítmico (MDL)</b> .....	<b>37</b>
3.6.3	<b>Método de Ajuste de Curva (<i>Curve fitting</i>)</b> .....	<b>38</b>
3.7	Técnica de Excitação por Impulso – TEI.....	39
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
4.1	Obtenção e caracterização do material .....	42
4.2	Módulo <i>Damping Curve</i> .....	43
4.3	Ensaio pela TEI.....	45
4.3.1	<b>Tutorial do módulo <i>Damping Curve</i></b> .....	<b>46</b>
4.4	Definição dos critérios de ensaio .....	49
4.4.1	<b>Avaliação dos pontos de aplicação da excitação</b> .....	<b>49</b>
4.4.2	<b>Avaliação do tempo de aquisição do sinal</b> .....	<b>50</b>
4.4.3	<b>Avaliação da região entorno da frequência selecionada(L)</b> .....	<b>51</b>
4.4.4	<b>Avaliação do método para estimar o amortecimento</b> .....	<b>52</b>
4.5	Danificação dos corpos de prova.....	53
4.6	Avaliação do dano no amortecimento do concreto .....	54
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>56</b>
5.1	Análise das frequências.....	56
5.2	Análise das curvas amortecimento <i>versus</i> amplitude .....	59
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE A – Manual para a construção do suporte</b> .....	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE B – Lista de materiais e custo para a fabricação do suporte</b> <b>UNILastic</b> .....	<b>80</b>
	<b>ANEXO A – Resultados dos ensaios de resistência à compressão com os</b> <b>corpos de prova moldados e testemunhos extraídos de 10 cm x 20 cm –</b> <b>Central dosadora CONCRET MAX S.A., Pdte. Franco/PY</b> .....	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto se deterioram (*e.g.*, edifícios altos, pontes, torres, museus e igrejas antigas), como consequência das mais diversas solicitações ou ações externas às quais são submetidas (*e.g.*, rajada de ventos, terremoto, tráfego de veículos). Nesse sentido, destaca-se a importância de uma inspeção adequada das estruturas, realizando o monitoramento, inspeção e avaliação da integridade da estrutura a fim de detectar danos que vierem a ocasionar prejuízos econômicos e humanos (CAO *et al.*, 2017; SAJID; CHOUINARD, 2019).

Como uma ferramenta de diagnóstico, destaca-se o conjunto de técnicas que permitem medir e caracterizar a condição das peças estruturais, sem danificá-las, denominada ensaios não destrutivos. Em sua maioria, têm recebido especial atenção nos setores aeroespacial, mecânico e civil (FRANCHETTI; MODENA; FENG, 2009), predominantemente realizados com a aplicação de metodologias de caráter visual, acústicos ou ultrassônicos, de campo magnético, radiografias, campo térmico etc. (CURADELLI *et al.*, 2008), limitadas pela acessibilidade ao local de estudo, ao conhecimento *a priori* da localização do dano, acrescentado o fato de que a maioria delas baseiam-se na medição de frequências e modos de vibração (DOEBLING *et al.*, 1996; CAWLEY; ADAMS, 1979; CURADELLI *et al.*, 2008; SWAMIDAS; CHEN, 1995) as quais requerem equipamentos de alto custo para medir estruturas de grande porte (FARRAR *et al.*, 1994; FARRAR; JAUREGUID, 1997; CHEN; XU; QU, 2005).

Como indicador alternativo para a detecção de dano, tem-se o amortecimento, destacado por vários autores (*e.g.*, ORBAN, 2011; CURADELLI *et al.*, 2008; CAO *et al.*, 2017), porque: (1) apresenta alta sensibilidade ao dano; (2) pode proporcionar a localização do dano auxiliado por outras ferramentas da análise modal; (3) pode-se estimar com precisão a partir da resposta vibracional contaminada por ruído do ambiente. Um exemplo encontrado na literatura é a medição das frequências de ressonância e amortecimento em epóxi e poliéster com partículas de quartzo, realizada nos estudos de Lifshitz e Rotem (1969). Os autores concluíram que o amortecimento era mais sensível aos danos do que as mudanças nas frequências. No entanto, Curadelli *et al.* (2008) ressalta o raro uso para a realização desses tipos de diagnósticos.

Como forma de avaliar a influência do dano no amortecimento do concreto submetida à solicitação aleatória, neste trabalho propõe-se a utilização do Método de Decremento Randômico (MDR) e Método de Ajuste da Curva (MAC). O uso e desenvolvimento do MDR foi

proposto por Cole (1973), inicialmente para avaliar a integridade estrutural de peças aeroespaciais. O MDR reduz o alto custo de inspeção das aeronaves no espaço de maneira simples e apresentando o diagnóstico em um curto lapso de tempo acompanhado de resultados satisfatórios (ASMUSSEN; IBRAHIM; BRINCKER, 1998). Alguns exemplos encontrados na literatura onde tem-se aplicado são: plataformas *off-shore* (YANG; CHEN; DAGALAKIS, 1984), viadutos (ASMUSSEN; IBRAHIM; BRINCKER, 1998), solos (HUERTA; ROESSET; STOKOE, 1998), ferrovias (HE *et al.*, 2011).

Por fim, um aspecto a ser pontuado, é que embora os ensaios não destrutivos já sejam utilizados em pequenas peças da indústria aeroespacial e da indústria de produção de aço estrutural, como, por exemplo, em rolamentos esféricos (WEST, 1982) e braços de robô de duas ligações (MAYES, 1992) tem-se dificuldade de aplicar os ensaios não destrutivos em pequenas peças de concreto (MINDESS, 2004). Nesse sentido o presente trabalho teve por finalidade avaliar a taxa de amortecimento, por meio de ensaio não destrutivo, como potencial indicador de dano em pequenas peças de concreto, utilizando corpos de prova cilíndricos de concreto submetidos a esforços de compressão uniaxial com diferentes valores de carga.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a influência do dano no amortecimento do concreto, a partir de resultados experimentais em corpos de prova de concreto, utilizando técnicas de processamento de sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar ensaios de excitação por impulso em corpos de prova de concreto danificados e não danificados;
- Analisar as respostas acústicas emitidas pelos corpos de prova num programa elaborado na linguagem MATLAB®, empregando os métodos de decaimento randômico, decaimento logarítmico e ajuste da curva;
- Propor um critério para possível identificação do dano em função da taxa de amortecimento do corpo de prova de concreto.



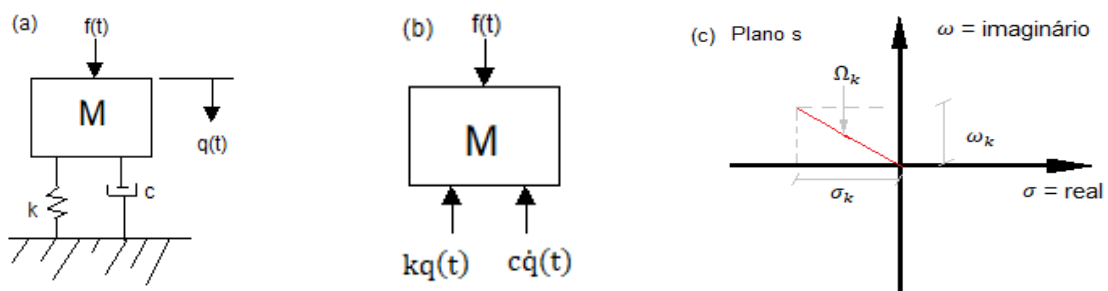
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção apresenta a teoria relevante dos conceitos abordados nos métodos descritos posteriormente.

#### 3.1 Sistemas amortecidos de um grau de liberdade

A identificação das propriedades modais de um sistema estrutural é o processo de correlacionar as características dinâmicas de um modelo matemático com as propriedades físicas do sistema derivadas de medições experimentais (BRINCKER; VENTURA, 2015a; TAKÁCS; ROHAL'-ILKIV, 2012a). Visando identificar as propriedades dinâmicas, define-se o modelo dinâmico da estrutura com um grau de liberdade (S1GL) de preferência, conforme Tse, Morse e Hinkle (1978b): (1) são os sistemas mais simples de analisar, (2) muitos problemas práticos podem se aproximar ao citado sistema e (3) as propriedades do S1GL também se encontram em sistemas de n-graus de liberdade (SNGL), permitindo a introdução aos conceitos de função de transferência, a transformada de Laplace, e aos parâmetros modais. O modelo idealizado do S1GL (**Figura 1a**) compõe-se de uma massa  $m$ , mola com rigidez constante  $k$ , amortecimento  $c$ , força externa aplicada ao sistema  $f(t)$  e o deslocamento  $q(t)$  (TSE; MORSE; HINKLE, 1978b; RAO, 1990b; GIRDHAR, 2004a). A **Figura 1c** indica a representação no plano complexo do sistema ou plano  $s$ .

**Figura 1** – Modelo idealizado do S1GL. (a) esquema. (b) diagrama do corpo livre. (c) representação do S1GL no plano  $s$ .



Fonte: Adaptada de Tse; Morse; Hinkle (1978a).

À medida que o movimento ocorre conforme a **Figura 1b**, e aplicando a segunda lei de Newton ( $\sum F_{ext} = ma$ ), a equação do movimento do sistema dinâmico é dada por (TAKÁCS; ROHAL'-ILKIV, 2012a; RAO, 1990b):

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = f(t) \quad (3.1a)$$

Onde:  $m\ddot{q}(t)$  – força de inércia,  $c\dot{q}(t)$  – força do amortecedor,  $kq(t)$  – força da mola,  $f(t)$  – força externa

Em geral, para um SNGL, é conveniente reescrever a **Equação 3.1a** em forma matricial (RAO, 1990c):

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\} \quad (3.1b)$$

Onde:  $[M]$  – matriz de massa;  $[C]$  – matriz de amortecimento;  $[K]$  – matriz de rigidez;  $\{F\}$  – vetor de força externa.  $\{q\}$  – vetor deslocamento.

### 3.1.1 Solução para vibrações forçadas

O comportamento no domínio do tempo (DT) de um sistema dinâmico complexo representado pela **Equação 3.1a** resulta numa informação muito útil. No entanto, para o presente trabalho, a informação no domínio da frequência (DF) revela-se ainda mais valiosa, ao introduzir um dos conceitos mais importantes utilizados no processamento de sinais digitais: a capacidade de transformar dados entre o DT ao DF e vice-versa, através de ferramentas matemáticas como a transformada de Fourier ( $\mathcal{F}\{f\}$ ) no tempo discreto e a transformada de Laplace ( $\mathcal{L}\{f(t)\}$ ) no tempo contínuo. (GIRDHAR, 2004b; 2004c; TAKÁCS; ROHAL'-ILKIV, 2012a; BRINCKER; VENTURA, 2015g; WHITE, 2010b).

A transformada de Laplace para a equação de movimento do S1GL, dada na **Equação 3.1a**, é (GIRDHAR, 2004c; BRINCKER; VENTURA, 2015g; WHITE, 2010c):

$$m[s^2Q(s) - sq(0) - \dot{q}(0)] + c[sQ(s) - q(0)] + kQ(s) = F(s) \quad (3.2)$$

Onde:  $Q(s)$  – transformada de Laplace de  $q(t)$ ;  $q(0)$  – deslocamento inicial;  $\dot{q}(0)$  – velocidade inicial;  $F(s)$  – transformada de Laplace de  $f(t)$ .

A **Equação 3.2** pode ser reescrita, considerando condições iniciais unitárias, como sendo:

$$[ms^2 + cs + k]Q(s) = F(s) \quad (3.3)$$

Resolvendo para  $Q(s)$  (ELISHAKOFF, 2017a; BRINCKER; VENTURA, 2015c; RAMSEY, 1975):

$$Q(s) = \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k} = F(s)H(s) \quad (3.4)$$

Onde:  $H(s)$  – função de transferência

Convém notar que a  $\mathcal{L}\{f(t)\}$  avalia variáveis complexas no plano  $s$ , definida como sendo  $s = \sigma + j\omega$  (**Figura 1c**), e a  $\mathcal{F}\{f\}$  avalia somente a parcela imaginária do plano  $s$ , ou seja, a  $\mathcal{F}\{f\}$  é obtida pela simples substituição de  $j\omega$  por  $s$  (BRINCKER; VENTURA, 2015g; RAMSEY, 1975; RAO, 1990d; TSE; MORSE; HINKLE, 1978a). Quando se aplica  $s = j\omega$  à função

de transferência, tem-se uma função de resposta em frequência (FRF). Assim a **Equação 3.4** reescreve-se como sendo (RAMSEY, 1975):

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} = \frac{1}{-m\omega^2 + cj\omega + k} \quad (3.5)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m}, \zeta = \frac{c}{C_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.6)$$

Onde:  $C_c$  – coeficiente de amortecimento crítico;  $\omega_n$  – frequência natural;  $\zeta$  – fator de amortecimento

Ao reescrever a **Equação 3.5** em termos da **Equação 3.6** tem-se a equação da FRF dada na seguinte equação (RAMSEY, 1975),

$$\frac{Q(j\omega)}{F(j\omega)} = H(j\omega) = \frac{1}{k \left[ 1 + 2\zeta j \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right) - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right]} \quad (3.7)$$

Onde:  $H(j\omega)$  – função resposta em frequência

Conclui-se assim que a função de transferência  $H(s)$  avaliada ao longo do eixo de frequências ( $s = j\omega$ ) é a FRF do S1GL.

Para SNGL (**Equação 3.2**), a função de transferência  $H(s)$  define-se como a matriz inversa do sistema  $B(s)$ ,

$$B(s) = Ms^2 + Cs + K \quad (3.8)$$

Onde:  $B(s)$  – matriz do sistema; M – matriz de massa; C – matriz de amortecimento; K – matriz de rigidez.

$$Q(s) = H(s)F(s) \quad (3.9)$$

Onde:  $Q(s)$  – transformada de Laplace do vetor resposta;  $H(s)$  – matriz de transferência;  $F(s)$  – transformada de Laplace do vetor força externa

Um elemento da matriz da transferência pode ser escrito em frações parciais conforme a seguinte expressão,

$$H(s) = \sum_{k=1}^{2n} \frac{a_k}{s - p_k} \quad (3.10a)$$

$$a_k = \left[ (s + p_k) \sum_{k=1}^{2n} \frac{a_k}{s - p_k} \right] \quad (3.10b)$$

Onde:  $n$  – número de grau de liberdade,  $p_k$  –  $k$ -ésima raiz da equação obtida definindo o determinante da matriz  $B(s)$  igual a zero,  $a_k$  – resíduos no pólo  $s = -p_k$ .

As raízes  $p_k$  denominam-se polos da função de transferência. Os mesmos são números complexos e ocorrem sempre em pares conjugados complexos, exceto quando o sistema está

criticamente amortecido ou superamortecido<sup>1</sup> (RAMSEY, 1975; TSE; MORSE; HINKLE, 1978b; SILVA, 2007). Cada par conjugado complexo representa um modo de vibração da estrutura,

$$p_k = -\sigma_k + j\omega_k \quad p_k^* = -\sigma_k - j\omega_k \quad (3.11a)$$

$$\sigma_k = \frac{c_k}{2m_k} \quad j\omega_k = \sqrt{\left(\frac{c_k}{2m_k}\right)^2 - \omega_k^2} \quad (3.11b)$$

Onde: \* denota a conjugada,  $\sigma_k$  – coeficiente de amortecimento,  $\omega_k$  – frequência natural;  $p_k$  – k-ésima raiz da equação obtida definindo o determinante da matriz  $B(s)$  igual a zero

Um conjunto alternativo de coordenadas para definir as localizações dos polos é a frequência ressonante, dada por:

$$\Omega_k = \sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2} \quad (3.12)$$

Onde:  $\Omega_k$  – frequência de ressonância

E o fator de amortecimento, dado por:

$$\zeta_k = -\frac{\sigma_k}{\Omega_k} \quad (3.13)$$

Onde:  $\zeta_k$  – fator de amortecimento

Sem impor restrições ao amortecimento independentemente do fato de que a matriz de amortecimento seja simétrica e com valor real, os vetores modais podem, em geral, ter valores complexos (RAMSEY, 1975; BRINCKER; VENTURA, 2015c). Assim a matriz de transferência para um modo reescreve-se como segue:

$$H_k(s) = \frac{a_k}{s - p_k} + \frac{a_k^*}{s - p_k^*} \quad (3.14)$$

Onde: \* denota a conjugada,  $a_k$  – resíduos no pólo  $s = -p_k$ ,  $p_k$  – k-ésima raiz da equação obtida definindo o determinante da matriz  $B(s)$  igual a zero.

### 3.1.2 Resposta ao impulso

Quando o sistema é submetido a uma excitação não-harmônico é mais difícil encontrarmos a solução. A ideia quando temos esse tipo de forçamento é dividir a função  $F(t)$  em impulsos com intervalos de tempo infinitesimais. Assumindo que a excitação da **Equação**

<sup>1</sup> A expressão dentro do radical da equação dos polos,  $j\omega_k$ , tem três resultados possíveis, a saber, igual a zero, maior que zero e menor que zero, cada um deles determina o comportamento do sistema como sendo criticamente amortecida, superamortecida e subamortecida, respectivamente (GÓMEZ ARAUJO, 2019).

**3.1** seja o impulso, a resposta ao impulso para o caso de um sistema subamortecido de um grau de liberdade  $k=1$  é dada pela seguinte equação (TSE; MORSE; HINKLE, 1978b):

$$h(t) = \frac{1}{\omega_d m} e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_d t \quad \therefore t > 0 \quad (3.15)$$

Sendo:  $\omega_d$  – frequência natural amortecida;  $\xi$  – fator de amortecimento;  $\omega_n$  – frequência natural;  $m$  – massa;  $t$  – tempo.

A resposta ao impulso em sistemas físicos reais pode ser obtida a partir da aplicação de impactos. No entanto, somente uma faixa de frequência máxima pode ser excitada na estrutura já que a energia do impacto é fisicamente limitada.

### 3.1.3 Integral da convolução

Considerando um sistema linear com resposta ao impulso ( $h(t)$ ) submetido a excitação ( $f(t)$ ) com condições iniciais nulas, a resposta do sistema  $q(t)$  resulta da convolução da resposta ao impulso  $h(t)$  com a excitação (ou sinal de entrada)  $f(t)$ . Ou seja, a integral de convolução, avalia a resposta no instante  $t$  ao impulso dado pela força aplicada em um instante  $\tau$ . Somando a contribuição de cada impulso de 0 a  $t$  tempos a resposta  $q(t)$  dada por (GÓMEZ ARAÚJO, 2019; RAMSEY, 1976; NOCETI FILHO, 2002a):

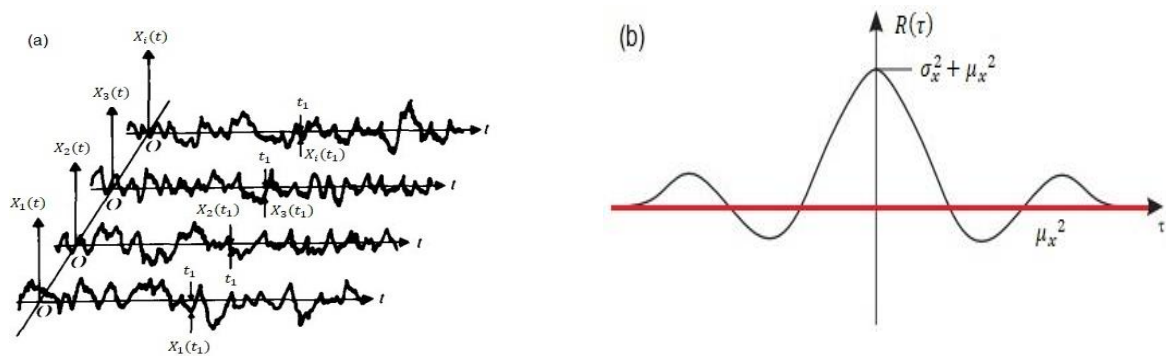
$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (3.16)$$

Sendo:  $h(t - \tau)$  – função de resposta ao impulso;  $q(t)$  – resposta do sistema;  $f(\tau)$  – força excitadora.

### 3.1.4 Estatística de processos aleatórios

Considere um processo aleatório  $X(t)$ , (e.g., aceleração do solo devido a terremotos) conforme ilustrado na **Figura 2a**, que num instante  $t_1$  a aceleração assume um valor aleatório  $X$ , a qual apresenta uma certa probabilidade de ocorrência onde tem-se que a distribuição da probabilidade de ocorrência da função aleatória está contida em um intervalo  $\Delta x$ , a função que representa a distribuição recebe o nome de função densidade de probabilidade, dada pela **Equação 3.17** (ELISHAKOFF, 2017b, 2017c; RAO, 1990e; BRINCKER; VENTURA, 2015b):

**Figura 2** – Vibrações aleatórias. (a) Conjunto de processos aleatórios. (b) Características da função de autocorrelação.



Fonte: Adaptada de Rao (1990e); Brincker e Ventura (2015b).

$$P[x_1 < X(t_1) < x_2] = \int_{x_1}^{x_2} p_x(X, t_1) dx \quad (3.17)$$

Sendo:  $X$  – variável aleatória;  $p_x$  – função densidade probabilidade de  $X$ .

Entre os valores estatísticos de uma função densidade de probabilidade, interessam o valor esperado do processo num dado instante e a média temporal de uma dada realização do processo. Para processos ergódicos a média é igual ao valor esperado (BRINCKER; VENTURA, 2015b) e calculada pela seguinte equação:

$$E[X] = \sum_{i=1}^N X_i P(X_i) = \mu_x(t) \quad (3.18)$$

Sendo:  $E[X]$  – valor esperado;  $P(X_i)$  – função densidade probabilidade de  $X$ ;  $X_i$  – valor do processo;  $N$  – número total de períodos;  $\mu_x(t)$  – média do processo.

Outros parâmetros estatísticos que interessam determinar são o valor quadrático médio e a variância, dados pelas **Equações 3.19 e 3.20**, respectivamente (GÓMEZ ARAÚJO, 2019):

$$E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} X^2 p_x(X) dx \quad (3.19)$$

$$\sigma_x^2 = E[(X - E[X])^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (X - E[X])^2 p_x(X) dx = E[X^2] - (\mu_x(t))^2 \quad (3.20)$$

Sendo:  $\sigma_x^2$  – variância do processo;  $E[X^2]$  – valor quadrático médio.

A expressão que caracteriza a distribuição gaussiana da função densidade probabilidade é dada por (ELISHAKOFF, 2017b):

$$p_x(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.21)$$

Sendo:  $\mu$  – média;  $p_x$  – função densidade probabilidade de  $X$ ;  $\sigma$  – desvio padrão.

A expressão matemática que denota estimação de duas variáveis aleatórias  $x(t)$ ,  $x(t + \tau)$  denomina-se função de autocorrelação ( $R_{xx}(\tau)$ ), definida como o valor esperado (ou média para todas as realizações do processo) do produto escalar ( $x(t)x(t + \tau)$ ) (BRINCKER; VENTURA, 2015b; GÓMEZ ARAÚJO, 2019):

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] \quad (3.22)$$

Para  $\tau = 0$

$$R_{xx}(0) = E[x(t)x(t + 0)] = \sigma_x^2 + \mu_x^2 \quad (3.23)$$

Para  $\tau = \infty$

$$R_{xx}(\tau \rightarrow \infty) = \mu_x^2 \quad (3.24)$$

Para processos estacionários, a função de autocorrelação é uma função par conforme mostra a **Figura 2b**, porque as propriedades estatísticas (e.g., média, variância) não variam com o tempo (RAO, 1990e):

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] = E[x(t - \tau)x(t)] = R_{xx}(-\tau) \quad (3.25)$$

A função de correlação cruzada define o valor esperado do produto de duas variáveis  $x$  e  $y$  ou  $y$  e  $x$ , dada pela seguinte expressão:

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)] \quad (3.26)$$

$$R_{yx}(\tau) = E[y(t)x(t + \tau)] \quad (3.27)$$

Se ambos processos forem estacionários, demonstra-se que estas funções não são iguais nem são funções pares.

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)] = E[y(t)x(t - \tau)] = R_{yx}(-\tau) \quad (3.28)$$

$$R_{yx}(\tau) = E[y(t)x(t + \tau)] = E[x(t)y(t - \tau)] = R_{xy}(-\tau) \quad (3.29)$$

### 3.2 Densidade espectral

Tradicionalmente os sinais são classificados em determinísticos e aleatórios. Um sinal determinístico pode-se expressar através de um modelo matemático e caracteriza-se por ser possível determinar no tempo um valor instantâneo, em um sinal aleatório não é possível. Outra forma de caracterizar os sinais é classificando-os em sinal de energia e sinal de potência. Um sinal de energia é caracterizado por ter uma potência média igual a zero (e.g., sinal transitório) enquanto que um sinal de energia é aquele que tem energia infinita (e.g., ruído e sinais periódicos). Associados aos sinais, tem-se a suas grandezas, no caso para o sinal de energia e

de potência, densidade espectral de energia e potência, respectivamente (GÓMEZ ARAÚJO, 2015; NOCETI FILHO, 2002a). Para o trabalho, o enfoque é o estudo da densidade espectral de potência.

A condição necessária para determinar a transformada de Fourier de uma função é descrita através da seguinte equação (ELISHAKOFF, 2017d; BRINCKER; VENTURA, 2015e, 2015f, 2015g):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (3.30)$$

Para satisfazer a condição, requer-se que o processo  $x(t)$  tenda para zero, para  $\tau = \infty$ . E sabendo que, se o processo  $x(t)$  tem média igual a zero, a função de autocorrelação tende para zero, para  $t = \infty$ . Desta forma, se o processo  $x(t)$  além de ser estocástico é estacionário e tem média nula, pode-se expressar o processo  $x(t)$  em termos da sua função de autocorrelação, conforme expresso na **Equação 3.31**:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |R_x(\tau)| d\tau < \infty \quad (3.31)$$

Dessa forma, a transformada de Fourier da função de autocorrelação pode definir-se pela **Equação 3.32** (GÓMEZ ARAÚJO, 2019; ELISHAKOFF, 2017d; BRINCKER; VENTURA, 2015e, 2015f, 2015g):

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3.32)$$

Onde:  $S_x(\omega)$  – densidade espectral da potência do processo aleatório em função de  $\omega$ ;  $R_x(\tau)$  – função de autocorrelação do processo aleatório

Em que  $S_x(\omega)$  é a densidade espectral do processo  $x(t)$ . A densidade espectral representa a transposição da função de autocorrelação (onde o sinal pertence ao domínio do tempo) para o domínio da frequência. A transformada inversa de Fourier para  $S_x(\omega)$  é dado por (GÓMEZ ARAÚJO, 2019; ELISHAKOFF, 2017d; BRINCKER; VENTURA, 2015e, 2015f, 2015g):

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.33)$$

Avaliando a definição anterior no tempo igual a zero podemos definir que a integral do espectro define a variância da resposta do sistema



$$R_x(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) 1 d\omega \quad (3.34)$$

Conclui-se que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega = E[x^2] \quad (3.35)$$

Em que a integral da função  $S_x(\omega)$  é igual ao valor quadrático médio do processo. Essa definição indica que as suas unidades são iguais ao quadrado das unidades de  $x(t)$  por unidade de frequência. Na literatura, encontra-se outra denominação para a função densidade espectral, sendo denominado densidade espectral da potência ou espectro da potência, pela relação entre as suas unidades (e.g., RAO, 1990e; TSE; MORSE; HINKLE, 1978b). Assim, pode-se dizer que para um intervalo de frequência ( $\Delta\omega$ ) a área sob a função  $S_x(\omega)$  representa a potência associada à frequência central desse intervalo.

### 3.2.1 Estimação do espectro com dados

O método não paramétrico mais utilizado para estimar o espectro é o método de Welch (1967). O método consiste basicamente em dividir o sinal em um número de segmentos possivelmente sobrepostos e avaliando a transformação de Fourier da Correlação em cada um desses segmentos.

Um deslocamento de ponto (D) é tomado em dois segmentos de dados sucessivos. Cada segmento consiste em N pontos de comprimento, onde a i-ésima sequência é dada pela expressão:

$$x_i(n) = x(n + iD) \quad \therefore n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.36)$$

A sobreposição entre dois segmentos consecutivos  $x_i(n)$  e  $x_{i+1}(n)$  é de N-D pontos. Se uma sobreposição de 50% for considerada, o número de seções K de comprimento L é:

$$K = \frac{2N}{L - 1} \quad (3.37)$$

Assim, além de manter a resolução em frequência do espectro, aproximadamente igual a  $1/NT_s$ , onde N é o número de amostras por segmento, devido a que o comprimento amostral não muda, a duplicação do número de espectros a ser calculada como média reduz a variância. Consequentemente, o espectro final obtém-se a partir da média dos diferentes espectros obtidos nos segmentos.

O cálculo da densidade espectral através do método Welch ajuda a melhorar significativamente a correlação dos dados, melhorando suas propriedades estatísticas e, assim, melhorando a confiabilidade da estimativa (SMITH, 2011).

### 3.2.2 Correlação entre $H(\omega)$ e $h(t)$

A partir das definições de correlação e a convolução, pode-se estabelecer relações importantes entre a densidade espectral da potência da força e da resposta. Primeiramente, define-se a função de correlação entre a força  $q(t)$  e a resposta  $y(t)$ :

$$R_{qy}(\tau) = E[q(t) \cdot y(t + \tau)] = E \left[ q(t) \cdot \sum_{L=0}^{t+\tau} h(L) \cdot q(t + \tau) \right] \quad (3.38)$$

$$= \sum_{L=0}^{t+\tau} h(L) \cdot R_{qq}(\tau)$$

$$S_{qy}(j\omega) = H(j\omega)S_{qq}(j\omega) \quad (3.39)$$

Onde:  $S_{qy}$  – densidade espectral entre a força e a resposta,  $H(j\omega)$  – função de transferência,  $S_{qq}$  – densidade espectral da força

E a função de correlação entre a resposta  $y(t)$ , dada por:

$$R_{yy}(\tau) = E[y(t) \cdot y(t + \tau)] = \sum h(-m) \cdot R_{qy}(\tau - m) \quad (3.40)$$

$$S_{yy}(j\omega) = H^*(j\omega)S_{qy}(j\omega) \quad (3.41)$$

Onde:  $S_{yy}$  – densidade espectral da resposta,  $S_{qy}$  – densidade espectral entre a força e a resposta, \* denota a conjugada,  $H(j\omega)$  – função de transferência.

Substituindo a **Equação 3.39** na **Equação 3.41**, tem-se a função de correlação do sistema definido como (GÓMEZ ARAÚJO, 2019):

$$S_{yy}(j\omega) = H^*(j\omega)H(j\omega)S_{qq}(j\omega) = |H(j\omega)|^2 S_{qq}(j\omega) \quad (3.42)$$

Onde:  $S_{yy}$  – densidade espectral da resposta,  $S_{qq}$  – densidade espectral da força,  $H(j\omega)$  – função de transferência do sistema

Definir a função de transferência segundo a **Equação 3.42** é importante devido ao fato de que é possível definir e estabelecer as características dinâmicas do sistema experimentalmente (RAMSEY, 1975; ELISHAKOFF, 2017d): (1) essa técnica mede a magnitude e a fase, uma vez que o espectro de potência cruzada contém informações de fase; (2) esta formulação não se limita aos sinais sinusoidais (3) e o cálculo da média pode ser aplicado à medição.

$$H(f) = \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{qq}}} \quad (3.43)$$

Onde:  $S_{yy}$  – densidade espectral da resposta,  $S_{qq}$  – densidade espectral da força.

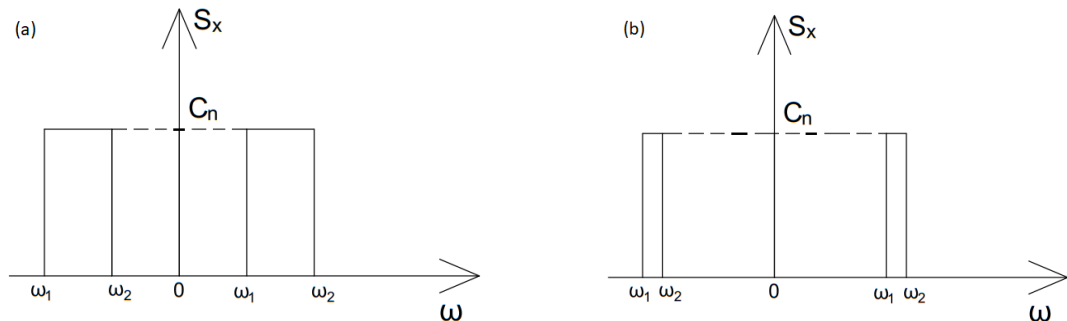
Aplicando a transformada inversa de Fourier à **Equação 3.43**, é definida de acordo com a **Equação 3.44** a resposta ao impulso  $h(t)$  do sistema linear estabelecido na **Equação 3.1a**:

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{qq}}} \quad (3.44)$$

Onde:  $S_{yy}$  – densidade espectral da resposta,  $S_{qq}$  – densidade espectral da força;  $h(t)$  – resposta ao impulso.

Neste ponto é importante mencionar que no processamento do sinal, um processo cuja densidade espectral ocupa apenas uma faixa estreita de frequências, denomina-se banda estreita e se a densidade espectral ocupa uma faixa larga de frequências é dito banda larga. O processo de banda larga de interesse para o trabalho é o ruído branco (*white noise*) (GIRDHAR, 2004c; BRINCKER; VENTURA, 2015e). A **Figura 3** ilustra a densidade espectral de ambos processos:

**Figura 3** - Densidade espectral de um processo: (a) banda larga e (b) banda estreita.



### 3.2.3 Ruído branco gaussiano

O ruído branco define-se por ter densidade espectral constante no intervalo de  $-\infty$  a  $\infty$ , e pode ser expresso por uma função no domínio do tempo como sendo uma correlação dado pelo impulso, (NOCETI FILHO 2002a). O ruído branco mais importante na natureza possui propriedades Gaussianas, com valor médio nulo ( $E[q(t)] = 0$ ) e com idêntica variância ( $\sigma^2$ ).

A função de autocorrelação de um processo de ruído branco com amplitude  $C_n$ , é uma função de Dirac (ou função impulso) definida na **Equação 3.45** (BRINCKER, VENTURA; 2015d; NOCETI FILHO, 2002b, 2002c). Na **Equação 3.46** e **Equação 3.47** definem-se a densidade espectral da potência do processo e da resposta ao processo respectivamente:

$$R_{qq}(\tau) = 2\pi C_n \delta(\tau) \quad (3.45)$$

$$S_{qq}(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{qq}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = C_n \quad (3.46)$$

$$S_{yy}(j\omega) = |H(j\omega)|^2 C_n \quad (3.47)$$

Gómez Araújo (2015) afirma que considerando o ruído branco como sinal de entrada pode-se determinar diretamente as propriedades dinâmicas a partir de unicamente a resposta do sistema. Pode-se notar que o impacto é equivalente ao impulso e tem a mesmas características, com um espectro plano e pode ser usado de forma análoga a um ruído branco como método excitação para obter características dinâmicas diretamente da resposta.

### 3.3 Fundamentos da vibração aleatória

Estruturas da engenharia civil (*e.g.*, edifícios altos, pontes, torres) não são prejudicadas apenas pela atividade sísmica e rajadas de vento, mas também por outras forças dinâmicas (*e.g.*, tráfego de veículos, explosões, movimento de pessoas), todas elas capazes de induzir vibrações de natureza aleatória, segundo a qual o valor da excitação em um determinado momento não pode ser previsto (TAKÁCS; ROHAL'-ILKIV, 2012b; BRINCKER; VENTURA, 2015a; RAO, 1990e; LIOU; WU; SHIN, 1999).

O conceito de vibração aleatória, conjunto de valores aleatórios, análise de séries temporais e processos estocásticos referem-se ao mesmo fenômeno (RAO, 1990e). Um processo estocástico compõe-se de registros que diferem entre si para as mesmas condições (*e.g.*, registros sísmicos num local) e estes conjuntos de valores não podem ser descritos através de relações matemáticas. No entanto, o fenômeno é descrito em termos estatísticos apropriados obtidos a partir da média do conjunto; e, caso as propriedades estatísticas sejam invariantes em relação ao tempo, o processo estocástico é dito estacionário (GÓMEZ ARAÚJO, 2019). Uma subclasse do processo estacionário são os processos ergódicos, a qual admite que as médias de qualquer um dos registros são iguais e suas propriedades estatísticas podem ser determinadas a partir de uma amostra do processo (TAKÁCS; ROHAL'-ILKIV, 2012b, NOCETI FILHO, 2002c). Do exposto, assumir a estacionaridade e a ergodicidade de processos resulta vital para a análise de vibrações aleatórias, porque bastaria a realização de um processo para inferir propriedades estatísticas em todo o processo.

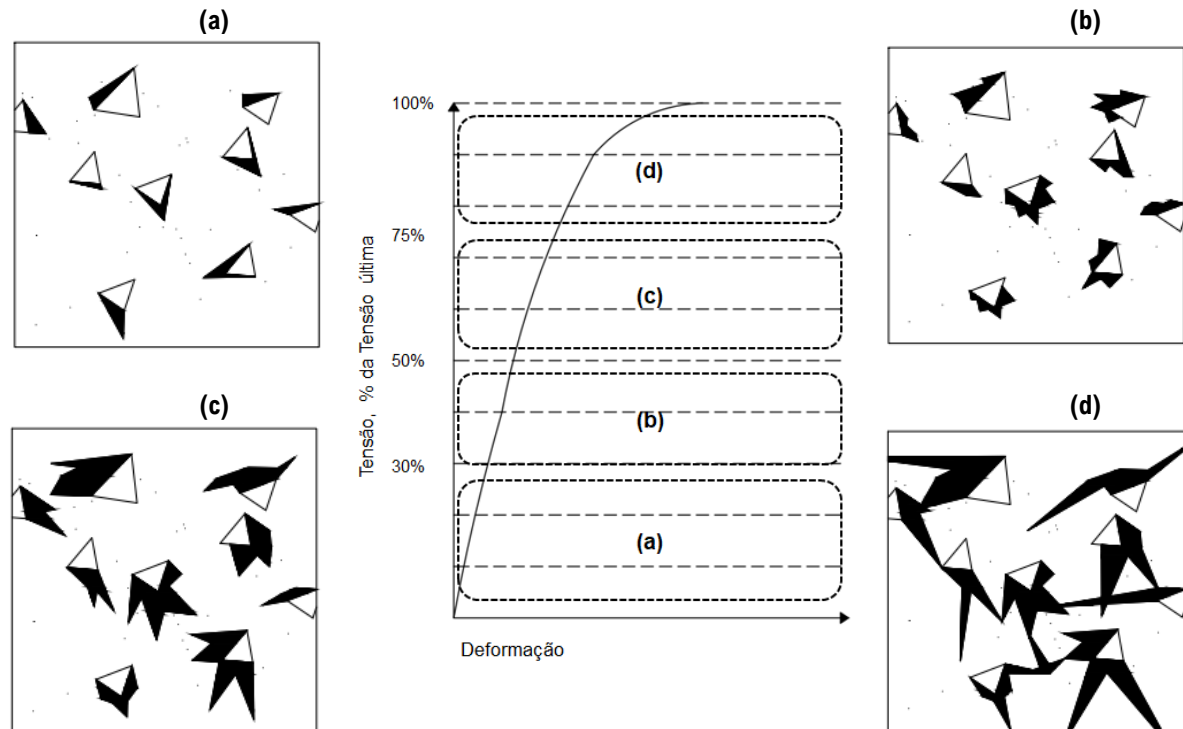
### 3.4 Comportamento mecânico no nível microscópico do concreto

O concreto em nível macroscópico, constitui-se de partículas de agregado dispersas em uma matriz de pasta de cimento. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), em nível microscópico, o concreto apresenta uma microestrutura complexa e heterogênea, constituída de duas fases: (1) as partículas de agregado com formas e tamanhos variados e (2) o meio ligante composto de uma massa de pasta de cimento. No entanto, para explicar muitos aspectos do comportamento do concreto sob tensão, faz-se necessário que a interface pasta de cimento-agregado seja tratada como uma terceira fase da microestrutura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Por exemplo, ao realizar vários cortes longitudinais no corpo de prova de concreto é possível observar as variações em quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases presentes. Entre as singularidades da microestrutura presentes no concreto, destaca-se a zona de transição da interface, sendo uma região próxima às partículas de agregado graúdo onde pode-se observar uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras (PAULON; KIRCHHEIM, 2011). Cabe ressaltar, que a presença de microfissuras na zona de transição acontece mesmo antes de a estrutura ser carregada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De fato, ao se utilizar uma prensa automatizada que permita a programação da velocidade de aplicação de carga, observa-se que o concreto somente pode ser considerado como elástico linear até um nível de tensões correspondentes à faixa de 40% a 50% da tensão de ruptura (**Figura 4**). Em níveis de carregamentos superiores a 50% da carga última de ruptura apresenta-se distorções no traçado da curva tensão-deformação devido à inclusão, no comportamento elástico do material, de fenômenos diferidos (*e.g.*, microfissuração, fluência, etc.) (GUJEL; KAZMIERCZAK; MASUERO, 2017). Esses fenômenos diferidos se tornam mais evidentes à medida que as tensões de compressão aplicadas crescem (PAULON; KIRCHHEIM, 2011; GUJEL; KAZMIERCZAK; MASUERO, 2017). Isto porque, inicialmente o agregado absorve a maior parte do carregamento, logo à medida que se deforma, transfere parte das cargas para a pasta de cimento, que começa a se destacar do agregado (SANTOS *et al.*, 2013). Em níveis de tensão maiores, cerca de 70% da resistência última, as concentrações de tensão nos grandes vazios na matriz argamassa se tornam grandes o suficiente para iniciar a fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Isso explica o fenômeno em que os componentes do concreto (*e.g.*, agregado e a matriz de pasta de cimento) normalmente permanecem elásticos até a ruptura em

um ensaio de compressão uniaxial, enquanto o concreto em si apresenta comportamento inelástico (GUJEL; KAZMIERCZAK; MASUERO, 2017).

**Figura 4** – Representação do efeito de microfissuração em corpos de prova cilíndricos de concreto para: (a) 30% da tensão última; (b) 50% da tensão última; (c) 75% da tensão última.



Fonte: Adaptado de Metha et. al. 2015

### 3.5 Detecção de danos com base na análise do amortecimento

A pesquisa sobre detecção de danos por vibração iniciou-se no final da década de 1970 em estruturas aeroespaciais (CAWLEY; ADAMS, 1979; HUNT *et al.*, 1990; COLE, 1973). Desde que Cawley e Adams (1979) propuseram pela primeira vez metodologias para localização do dano no setor da engenharia civil, através da medição de vibrações, revisões bibliográficas sobre identificação de danos e monitorização de estruturas com base nas alterações medidas das propriedades dinâmicas foram publicadas (*e.g.*, HUNT *et al.*, 1990; JIANG; ADELI, 2005, 2007a, 2007b, 2008; ADELI; JIANG, 2006; PAKRASHI; O'CONNOR; BASU, 2008; HE *et al.*, 2008). No entanto, vale ressaltar que esses estudos consistiam em medir as alterações das frequências naturais e na modelagem de danos como uma redução local da rigidez (MODENA; SONDA; ZONTA, 1999).

Em quanto ao amortecimento, raramente é considerado para o diagnóstico de danos (*e.g.*, detecção de fissuras numa estrutura) embora apresente vantagens sobre os métodos de detecção baseados em frequências (KAWIECKI, 2001). Isto deve-se ao fato de que estimar o amortecimento em um sistema estrutural é particularmente difícil quando comparado a outras características dinâmicas da estrutura (*i.e.*, a massa e a rigidez do sistema), porque: (1) o amortecimento não está relacionado a um único fenômeno físico (KAREEM; GURLEY, 1996) e (2) caso a técnica para estimar o amortecimento não for adequada, a taxa de amortecimento divergirá bastante do valor real (TAMURA, 2012).

De fato, quando as fissuras resultam em pequenas ou nenhuma variação de frequência, a alteração do amortecimento é capaz de detectar efeitos não lineares e dissipativos que as fissuras produzem (CURADELLI *et al.*, 2008). Modena, Sonda e Zonta (1999) demonstraram em elementos pré-fabricados de concreto armado que a taxa de amortecimento na presença de fissuras visualmente indetectáveis apresentaram mudanças em torno de 50% em relação ao estado inicial da peça. Em específico, Kawiecki (2001) afirma que o amortecimento é particularmente adequado para o monitoramento da integridade estrutural tanto de estruturas leves quanto de microestruturas.

Do exposto, fica claro que o amortecimento se tornou conseqüentemente uma alternativa muito atrativa para detectar dano (CURADELLI *et al.*, 2008). No entanto, vários autores destacam a necessidade de mais pesquisas sobre o amortecimento como indicador de dano, isso porque vários mecanismos de dissipação de energia encontram-se associado ao sistema (ZONTA; MODENA; BURSI, 2000).

### **3.5.1 Fundamentação teórica do amortecimento**

Silva (2007) define que o amortecimento de uma estrutura vibratória está associado a uma dissipação de energia mecânica, sendo considerado um fenômeno muito complexo. Diferentes tipos de dissipação de energia podem estar presentes a qualquer instante, alguns associados às propriedades do material, outros, às condições de contorno do sistema (GUTENBRUNNER; SAVOV; WENZEL, 2007; FEENY; LIANG, 1996).

Assim, resulta útil estabelecer uma relação entre a energia dissipada e a constante de amortecimento do sistema. Em se tratando de vibração livre, a presença de amortecimento resulta em uma contínua diminuição da amplitude (ORBAN, 2011). Se o movimento se caracteriza por uma oscilação, o estado da estrutura pode ser descrito pela combinação de

energia cinética e potencial e a cada ciclo a quantidade de perda de energia  $\Delta E$  expressa-se como sendo (FRIZZARIN *et al.*, 2010),

$$\Delta E = \oint \sigma d\varepsilon \quad (3.48)$$

Onde:  $\sigma$  – tensão (esforço);  $\varepsilon$  – deformação

Orban (2011) cita os principais fatores associado ao dado fenômeno: (1) o amortecimento viscoso (*material damping*) e (2) o amortecimento devido ao atrito nas fronteiras entre os materiais (amortecimento de Coulomb) (FRIZZARIN *et al.*, 2010). No âmbito das estruturas de engenharia civil, Mahrenholtz e Bachmann (1991 *apud* FRIZZARIN *et al.*, 2010); Zonta e Modena (2001); Swamidias e Chen (1995) afirmam que a variação do amortecimento associada à formação de mecanismo de dissipação não linear deve-se à fissura (KÖNIG; FEHLING, 1988), a qual não apresenta um amortecimento puramente viscoso.

### 3.5.2 Modelos de amortecimento

Boa parte dos modelos de amortecimento normalmente utilizados descrevem-se a partir da seguinte equação (ADHIKARI, 2000):

$$f_d(x, \dot{x}) = a\dot{x}|\dot{x}|^{\theta-1} \quad (3.49)$$

Onde:  $f_d(x, \dot{x})$  – força de amortecimento;  $a$  – coeficiente de amortecimento;  $\dot{x}$  – velocidade do deslocamento.

Os modelos de amortecimentos variam em função do valor de  $\theta$ , esses valores e dos respectivos modelos de amortecimento podem ser verificados através da **Quadro 1**, a seguir.

**Quadro 1** – Modelos de amortecimento

Nome do modelo	Expressão matemática	Fator de amortecimento ( $\xi$ )
Amortecimento viscoso ( $\theta = 1$ )	$f_d(x, \dot{x}) = c\dot{x}$	$\frac{c}{2m\omega}$
Amortecimento de Coulomb ( $\theta = 0$ )	$f_d(x, \dot{x}) = \mu \frac{\dot{x}}{ \dot{x} } = \mu \operatorname{sgn}(\dot{x})$	$\frac{2\mu}{\pi m\omega^2 A}$
Amortecimento da Lei-do-quadrado ( $\theta = 2$ )	$f_d(x, \dot{x}) = q\dot{x} \dot{x} $	$4q \frac{A}{3\pi m}$

**Fonte:** Orban (2011); Frizzarin *et al.*, (2010); Kareem e Gurley (1996)

Onde:  $c$  – coeficiente de amortecimento viscoso;  $q$  – coeficiente de amortecimento da lei-do-quadrado;  $A$  – amplitude do movimento;  $\mu$  - parâmetro do modelo de amortecimento exponencial.

É importante ressaltar que o amortecimento viscoso é independente da amplitude, enquanto que para o amortecimento de Coulomb e da lei-do-quadrado são inversa e diretamente



proporcionais, respectivamente. Tratando-se de um sistema ligeiramente amortecido, em que os três mecanismos de amortecimento anteriores podem estar presentes, uma aproximação de primeira ordem para o amortecimento total presente no sistema pode ser obtida através do ajuste dos dados a partir da **Equação 3.49** (KAREEM; GURLEY, 1996).

### 3.6 Técnicas de estimativa do amortecimento

Existem hoje na literatura diversos métodos que visam estimar a taxa de amortecimento (BRINCKER; ZHANG; ANDERSON, 2000; TAMURA *et al.*, 2002; AGENNI; CREMA, 1989; RUZZENE *et al.*, 1997; LAMARQUE; PERNOT; CUER, 1999). Neste sentido, com o objetivo de proporcionar uma visão geral, no **Quadro 2** são apresentadas algumas técnicas de estimativa do parâmetro amortecimento, as quais resultam da RVLA (*resposta de vibração livre amortecida*), FRI (*função resposta ao impulso*) e FRF. Na sequência, apresentam-se o MRD (COLE, 1973) e duas técnicas de avaliação do sinal RD.

**Quadro 2** – Técnicas de estimativa do amortecimento

Técnicas no domínio do tempo		
Decremento Logarítmico	DL	- RVLA - Método de ajuste da curva SDOF
Decremento Randômico	DR	- Método SDOF extraído RVLA - DL
Transformada de Hilbert	TH	- DL - FRF
Técnicas no domínio da frequência		
Método da largura de banda de meia potência	HP	- Auto DEP - SDOF
Função de transferência	FT	- FRF - Método de ajuste da curva SDOF
Método $1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	- FRF
Decomposição no Domínio da Frequência	DDF	- Matriz DEP - DVS - Seleção de picos
Transformada Wavelet	TW	- Decomposição de séries temporais - FRT
Método de Ajuste de Curva	MAC	- Matriz DEP - HP - Método de ajuste da curva SDOF
Legenda: RVLA – resposta de vibração livre amortecida; SDOF – sistema de um grau de liberdade; FRF – função resposta em frequência; DEP – densidade espectral de potência; DVS – decomposição em valores singulares; FRT – função resposta no domínio do tempo.		

**Fonte:** Adaptado de Tamura (2012); Cunha e Caetano (2006)

### 3.6.1 Método do Decremento Randômico (MDR)

O método de decremento randômico (*random decrement technique*), doravante denominado MRD, é um método no domínio do tempo desenvolvido na NASA e introduzida pela primeira vez por Cole (1973). A ideia básica é transformar uma série temporal randômica em uma resposta de vibração livre do sistema, segundo a escolha dos segmentos de tempo e calculando a média deles sempre que a série cronológica cumprir uma determinada condição chamada "*condição de gatilho*" (TAMURA, 2012), tendo-se unicamente informação dinâmica da estrutura e permitindo extrair parâmetros modais (*e.g.*, frequência natural, taxa de amortecimento) (ASMUSSEN, 1997). Além disso, utiliza os dados da resposta livre de diferentes pontos medidos simultaneamente para estimar o sinal RD, ferramenta válida para caracterizar uma série estocástica temporal segundo Brincker e Ventura (2015e). Uma breve descrição dos princípios do MDR apresenta-se a seguir.

Considere um S1GL e que para sistemas lineares é válida aplicar a lei da sobreposição (TSE; MORSE; HINKLE, 1978b), portanto a solução da **Equação 3.3** é dada por (HE *et al.*, 2011):

$$q(t) = q(0)D(t) + \dot{q}(0)v(t) + \int_0^t h(t-i)f(i)\partial i \quad (3.50)$$

Sendo:  $D(t)$  – é a resposta livre por uma condição inicial de deslocamento;  $v(t)$  – é a resposta livre por uma condição inicial de velocidade;  $h(t)$  – é a resposta ao impulso;  $q(0)$  – condição inicial de deslocamento;  $\dot{q}(0)$  – condição inicial de velocidade;  $f(i)$  – excitação aleatória aplicada ao S1GL.

Quanto ao conceito e validade do método RD, Cole (1968 *apud* Asmussen, 1997) afirma que:

A resposta aleatória de uma estrutura no tempo  $t + t_i$  é composta por três parcelas: 1) a resposta devido ao deslocamento inicial no tempo  $t = t_i$ , 2) a resposta ao impulso devido à velocidade inicial no instante  $t = t_i$ , 3) a excitação aleatória  $f(t)$  que é aplicada à estrutura durante o período de tempo de  $t_i$  até  $t + t_i$ .

De um modo geral, e dado por (HE *et al.*, 2011):

$$q(t - t_i) = q(0)D(t - t_i) + \dot{q}(0)v(t - t_i) + \int_{t_i}^t h(t - \tau)f(\tau)\partial \tau \quad (3.51)$$

Assumindo que  $f(t)$  é uma excitação do tipo ruído branco de origem gaussiano estacionário com média zero, ao extrair a média de várias amostras da resposta aleatória a média da parcela aleatória da resposta é zero,  $E[f(t)] = 0$  (YANG *et al.*, 1983; GÓMEZ ARAÚJO, 2015). Contudo, para evitar que a parte determinística (impulso e/ou deslocamento)

se anule, apresentam-se no **Quadro 3** as condições de passagem de nível ou “condições de gatilho”.

**Quadro 3** – Condições de passagem de nível.

Condição	Expressão matemática
1. Condição geral	$T(t_i) = \{a_1 \leq q_0(t) \leq a_2, v_1 \leq \dot{q}_0(t) \leq v_2\}$
2. Passagem de nível	$T(t_i) = \{q_0(t) = a_1, -\infty \leq \dot{q}_0(t) \leq \infty\}$
3. Passagem de pontos positivos	$T(t_i) = \{a_1 \leq q_0(t) \leq a_2, -\infty \leq \dot{q}_0(t) \leq \infty\}$
4. Passagem de zeros	$T(t_i) = \{q_0(t) = 0, 0 \leq \dot{q}_0 \leq \infty\}$
5. Extremos locais	$T(t_i) = \{0 \leq q_0 \leq \infty, \dot{q}_0 = 0\}$

Fonte: Asmussen, 1997

De um modo geral, arbitrando um comprimento  $L$  do sinal e selecionando um valor  $q_0$  apropriado para interceptar os dados amostral  $q(t)$  (**Figura 5a**), o tempo correspondente ao ponto de intersecção é indicado como  $t_i$  ( $i \in N$ ) (GÓMEZ ARAÚJO, 2015). Assim, várias subamostras podem ser obtidas para cada  $t_i$  ( $i \in N$ ) (**Figura 5b**), e sob ação de  $f(t)$  a resposta  $q(t)$  do sistema é também um processo gaussiano estacionário com média zero, portanto, a velocidade média  $\dot{q}(t)$  terá média zero. Reescrevendo a **Equação 3.51** em termos de valor esperado tem-se (HE *et al.*, 2011):

$$\begin{aligned}
 E[Q(t)] &= E[q(0)]D(t) + E[\dot{q}(0)]v(t) + \int_0^t h(t-\tau)E[f(\tau)]\partial\tau \\
 &= E[q(0)]D(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.52}$$

Sendo:  $E[Q(t)]$  – o valor esperado de  $Q(t)$ ;  $q(0)$ ,  $\dot{q}(0)$  – condições iniciais de deslocamento e velocidade respectivamente;  $D(t)$ ,  $v(t)$  – resposta às condições iniciais;  $h(t-\tau)$  – resposta ao impulso;  $E[f(\tau)]$  – o valor esperado da excitação aleatória;  $Q(t)$  – sinal aleatório.

Nota-se que o valor esperado do sinal  $Q(t)$  é uma resposta de vibração livre com deslocamento inicial  $E[q(0)]$  e velocidade inicial zero (ELISHAKOFF, 2017b). Em virtude do comprimento amostral limitado para a medição real, os valores da média aritmética adotam-se como aproximação do valor esperado do sinal (HE *et al.*, 2011):

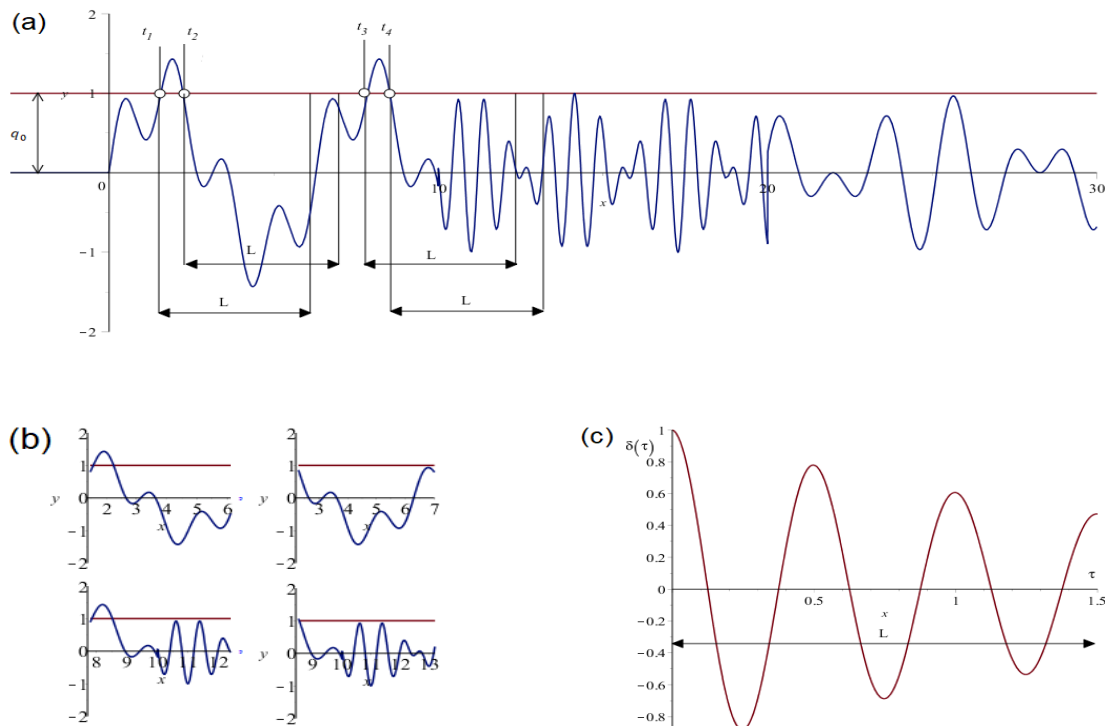
$$E[Q(t)] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q(t_i + \tau)
 \tag{3.53}$$

Todo tempo  $t$  quando a amplitude do sinal atingir um determinado valor  $q_0$  a média dos segmentos  $N$  da medição de resposta produz uma função no domínio do tempo conhecido por sinal RD, como mostra a **Figura 5c** (HE *et al.*, 2011).

$$RD(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_0(t_i + L) |T(t_i) \quad (3.54)$$

Sendo:  $N$  – número de segmentos extraídos;  $T(t_i)$  – condição para extrair os segmentos de  $q(t)$ .

**Figura 5** – Procedimento do MDR: (a) seleção dos segmentos de tempo da resposta ao processo  $x(t)$ ; (b) o cálculo da média dos segmentos de tempo; (c) o sinal RD resultante do cálculo.



Fonte: Adaptada de HE et al., (2011)

Para um S1GL, em sinal RD a frequência natural e a taxa de amortecimento podem ser calculadas usando os métodos de identificação, uma vez que o sinal RD é uma curva que representa a resposta de um sistema de vibração livre (YANG *et al.*, 1983). Devido ao ruído do sinal, a limitação no tempo de aquisição e processamento dos dados, a condição (3) resulta na melhor escolha porque oferece mais segmentos a serem extraídos quando comparado às demais condições para o cálculo da média, independente da natureza estatística da medição (ASMUSSEN, 1997).

Ao obter a resposta de vibração livre do sistema usando o método RD, o passo final é determinar a taxa de amortecimento de cada um dos modos presentes na resposta de vibração livre amortecida.

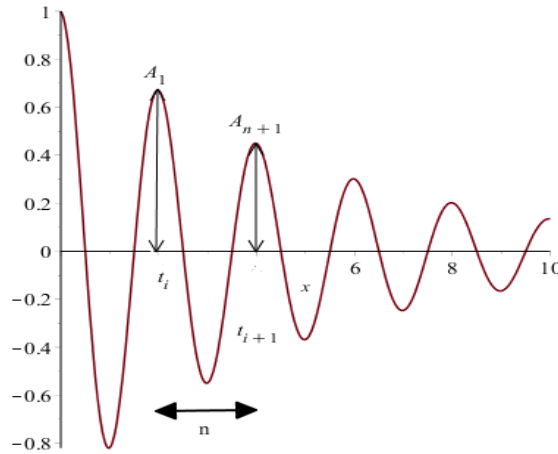
### 3.6.2 Método do Decremento Logarítmico (MDL)

Segundo Lamarque, Pernot e Cuer (1999), o método do decremento logarítmico (MDL) destaca-se na identificação do amortecimento viscoso associado a ruídos pré-filtrados em S1GL, registrados no DT. O decremento logarítmico ( $\delta$ ) é a variação relativa média da amplitude  $A$  da resposta a uma vibração livre conforme mostra a **Figura 6** (MAGALAS; MALINOWSKI, 2003; RAO, 1990b; MORSY *et al.*, 2016):

$$\delta = -\frac{1}{n} \int_1^{n+1} \frac{\partial A}{A} = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_{n+1}} \quad (3.55)$$

Sendo:  $A_n, A_{n+1}$  – amplitude;  $\delta$  – decremento logarítmico;  $n$  – número de oscilações (ou ciclos) para o decremento das amplitudes  $A_n$  até  $A_{n+1}$

**Figura 6** – Resposta da vibração livre amortecida.



Fonte: Adaptada de Rao (1990b)

Apesar da **Equação 3.55** ser amplamente aplicada, a mesma exige a utilização de técnicas especiais de aquisição de sinais e métodos computacionais para resultados precisos. Outro método de cálculo apresentado por Magalas e Malinowski (2003) a partir da altura das  $n$  amplitudes sucessivas foi:

$$\delta = -\frac{T}{W} \quad (3.56a)$$

$$T = n \sum_{i=1}^n B_i n_i - \sum_{i=1}^n B_i \sum_{i=1}^n n_i \quad (3.56b)$$

$$W = n \sum_{i=1}^n n_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n n_i \right)^2 \quad (3.56c)$$

Sendo:  $B_i$  – logaritmo natural da amplitude da  $i$ -ésima oscilação;  $n$  – número de oscilações (ou ciclos) para o decremento das amplitudes  $A_n$  até  $A_{n+1}$

Contudo, para o cálculo do decremento logarítmico com um número limitado de oscilações, isto é, somente para  $\delta$  acima de  $4 \times 10^{-3}$ , o algoritmo recomendado é a média do decremento logarítmico (MAGALAS; MALINOWSKI, 2003):

$$\delta = \frac{1}{\left(\frac{n}{2}\right)^2} \cdot \left( \sum_{i=1}^{n/2} \ln \frac{A_i}{A_{i+\left(\frac{n}{2}\right)}} \right) \quad (3.57)$$

Sendo:  $A_i, A_{i+\left(\frac{n}{2}\right)}$  – amplitude;  $\delta$  – decremento logarítmico;  $n$  – número de oscilações (ou ciclos) para o decremento das amplitudes  $A_i$  até  $A_{i+\left(\frac{n}{2}\right)}$ .

Finalmente, o fator de amortecimento em função de  $\delta$  calcula-se a partir da **Equação 3.58** (MORSY *et al.*, 2016).

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (3.58)$$

Sendo:  $\xi$  – fator de amortecimento;  $\delta$  – decremento logarítmico.

### 3.6.3 Método de Ajuste de Curva (*Curve fitting*)

O método de ajuste de curva é uma abordagem alternativa inovadora que utiliza o ajuste de curvas do espectro de um S1GL. O principal benefício é uma estimativa mais precisa das frequências naturais e taxas de amortecimento, tanto no caso de excitação estocástica pura quanto na presença de excitação determinística (JACOBSEN; ANDERSEN; BRINCKER, 2008).

Na **Equação 3.43** definiu-se a função de transferência em termos dos espectros da entrada e saída (*i.e.*, excitação e resposta), definindo em termos polinomiais, para um S1GL tem-se (LJUNG, 1999):

$$H(f) = \frac{B_0 + B_1 e^{2\pi f T} + B_2 e^{4\pi f T}}{1 + A_1 e^{2\pi f T} + A_2 e^{4\pi f T}} = \frac{B(f)}{A(f)} \quad (3.59)$$

Onde: T – intervalo de amostragem

O método de ajuste de curva exige as seguintes suposições: (1) a excitação  $S_{qq}(j\omega)$  é do tipo banda larga e (2) pode-se aproximar como sendo um espectro constante do tipo ruído branco  $S_{qq}(j\omega) = C_n$  (JACOBSEN; ANDERSEN; BRINCKER, 2008). No que respeita à estimativa, quer seja da frequência, quer seja do amortecimento, apresenta-se o seguinte algorítmico de cálculo (JACOBSEN; ANDERSEN; BRINCKER, 2008):

- a) Estimar o espectro  $S_{yy}(j\omega)$  do S1GL;

- b) Calcular a raiz do espectro  $S_{yy}(j\omega)$ ;  
 c) Construir as seguintes matrizes;

$$A_c = \begin{bmatrix} -P(f_0)e^{2\pi f_0 T} & -P(f_0)e^{4\pi f_0 T} & 1 & e^{2\pi f_0 T} & e^{4\pi f_0 T} \\ -P(f_1)e^{2\pi f_1 T} & -P(f_1)e^{4\pi f_1 T} & 1 & e^{2\pi f_1 T} & e^{4\pi f_1 T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -P(f_n)e^{2\pi f_n T} & -P(f_n)e^{4\pi f_n T} & 1 & e^{2\pi f_n T} & e^{4\pi f_n T} \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} P(f_0) \\ P(f_1) \\ \vdots \\ P(f_n) \end{bmatrix}$$

Onde:  $v$  – índice da frequência Nyquist;  $P(j\omega)$  – raiz do espectro  $S_{yy}(j\omega)$

- d) Resolver o seguinte problema de regressão;

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} Re(A_c) \\ Im(A_c) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Re(B_c) \\ Im(B_c) \end{bmatrix}$$

- e) As estimativas são dadas por;

$$\theta = [A_1 \quad A_2 \quad B_0 \quad B_1 \quad B_2]^T$$

- f) A frequência e o amortecimento são obtidos a partir das raízes de  $A(f)$  que são os polos do sistema e utilizando as **Equação 3.12** e **Equação 3.13**.

### 3.7 Técnica de Excitação por Impulso – TEI

A Técnica de Excitação por Impulso (TEI) é essencialmente um ensaio não destrutivo (END) descrito na ASTM E1876-15 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015) para a determinação dos módulos elásticos de materiais (*i.e.*, E, G e  $\nu$ ) a partir da resposta vibracional da amostra ensaiada, consiste na determinação de uma ou mais frequências de ressonância de um sistema excitado por impactos leves após um período de tempo determinado (ROEBBEN *et al.*, 1997). A amostra apoia-se em seus nós da ressonância fundamental ( $0,224L$  de cada extremidade, onde L é o comprimento da amostra), porque a localização se relaciona com os métodos matemáticos descrito na norma ASTM E1876-15 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015). Tal técnica não é recomendada para o estudo em estruturas não lineares (HALVORSEN; ANATROL CORPORATION; BROWN, 1977).

A TEI destaca-se pelos seguintes fatores (DAVIS, 2003; ROEBBEN *et al.*, 2000): (1) medição rápida (*i.e.*, configuração simples do equipamento); (2) restrições limitadas na geometria e dimensões da amostra; (3) adequação para medições (END) repetidas em função

do tempo, temperatura ou outras ações sobre o material e (4) processamento automático de sinal digital. A seguir apresentam-se os domínios de aplicação da TEI.

**Quadro 4 – Domínios de aplicação e resultados do TEI**

Domínio de aplicação	Resultados
<b>Estrutura cristalina do material</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solução sólida</li> <li>• Difusão molecular</li> <li>• Transição de fase</li> <li>• Defeito cristalográfico</li> <li>• Deslocamento (defeito cristalino)</li> </ul>
<b>Propriedades do material</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Módulo de Young</li> <li>• Módulo de cisalhamento</li> <li>• Coeficiente de Poisson</li> <li>• Fluência</li> <li>• Ductilidade</li> </ul>
<b>Dano no material</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Térmico</li> <li>• Tensão</li> <li>• Carregamento cíclico</li> <li>• Radiação</li> <li>• Gases</li> </ul>
<b>Controle de sistema</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualidade dos sistemas</li> <li>• Amortecimento estrutural</li> <li>• Inspeção de falhas</li> </ul>

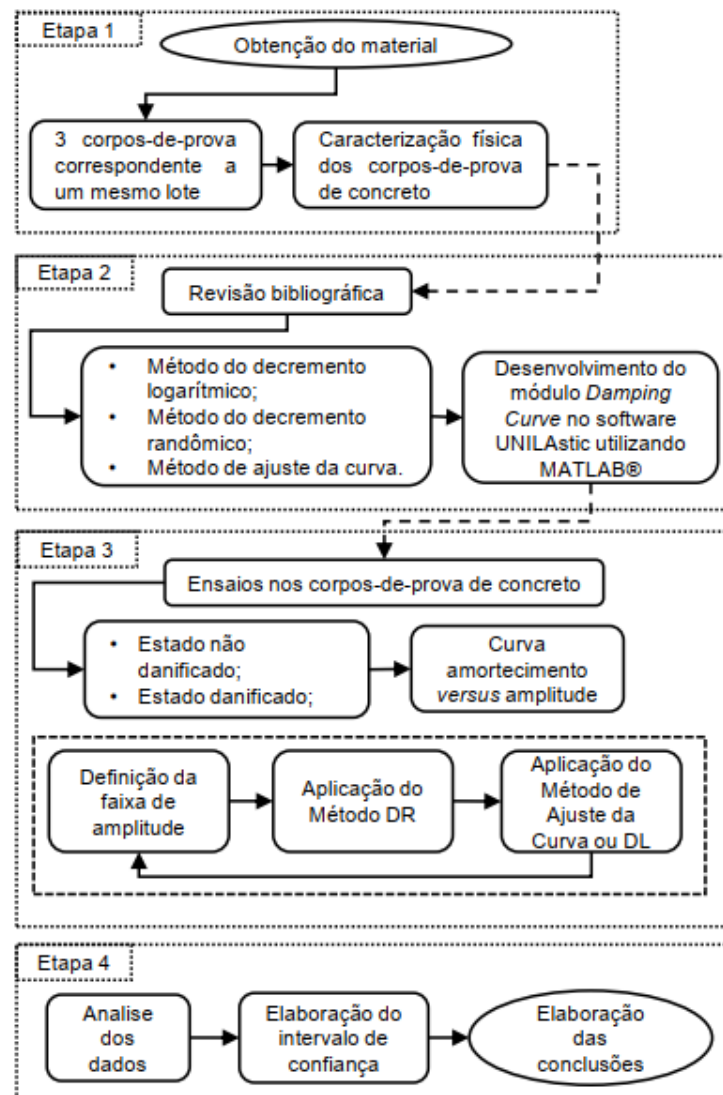
**Fonte:** Halvorsen, Anatrol Corporation e Brown (1977), Tognana *et al.* (2010), Paolino *et al.* (2017), Psiuk *et al.* (2015); Neild, Williams e McFadden (2003)



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do trabalho, a metodologia dividiu-se em quatro etapas (**Figura 7**): (1) obtenção do material a ser avaliado no trabalho; (2) revisão bibliográfica e seleção da metodologia para estimar a taxa de amortecimento do material, para implementar no *software* com interface gráfica; (3) realização dos ensaios no suporte e com o *software*, verificando a influência do dano no amortecimento nos estados não danificado e danificado do material; e (4) avaliação da influência do dano segundo a comparação entre as curvas geradas nas condições com e sem a presença de dano nas amostras. Na sequência apresenta-se o fluxograma de trabalho e descreve-se de forma sucinta os detalhes de cada etapa adotada nele.

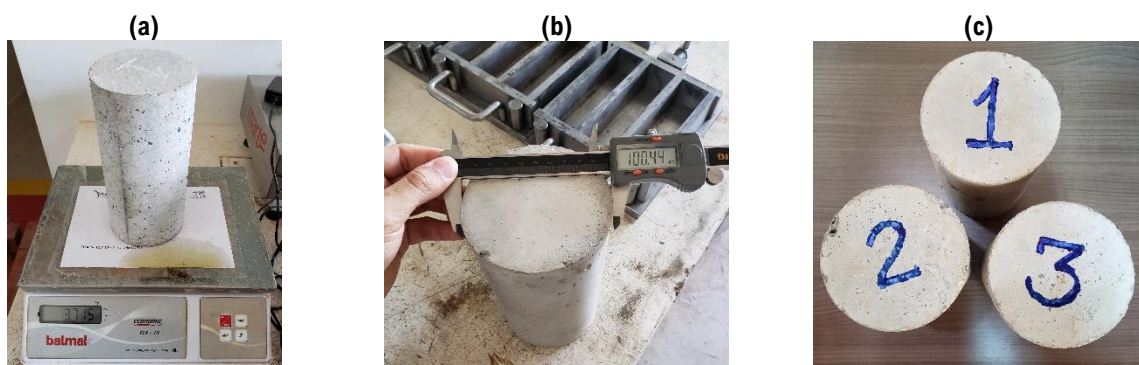
**Figura 7** – Fluxograma da metodologia de trabalho.



#### 4.1 Obtenção e caracterização do material

Para a realização do trabalho, três corpos de prova foram gentilmente doados pela empresa *Concret Max Monday S.A.* Os três corpos de prova pertencem a um lote de cinco corpos de prova que foram moldados no formato cilíndrico e preenchidos com o concreto descarregado pelo caminhão betoneira *Mixer 4*. No **Anexo A**, apresentam-se os resultados do ensaio de resistência atingida aos 7 dias por todos os corpos de prova moldados no dia 8 de outubro de 2019, realizada pela mesma empresa de concreto usinado. Destaque para os valores de carga de ruptura, de 217,855 kN e 211,696 kN aplicada aos corpos de prova identificados pelos números 19800 e 19801 respectivamente, necessários para evitar aplicar uma carga próxima a esses valores, tal que leve a ruptura dos três corpos de prova a serem utilizados. Após o transporte dos corpos de prova para o laboratório, esses foram identificados numericamente com marcador permanente de tinta azul, pesados com uma balança de precisão igual a 0,001 kg e tanto o diâmetro como o comprimento foram medidos em três pontos diferentes, utilizando-se um paquímetro de precisão igual a 0,01 mm, de maneira a calcular as dimensões médias. Na **Figura 8** pode-se observar o processo de caracterização e na **Tabela 1** resumem-se os resultados do processo realizado.

**Figura 8** – Caracterização física dos corpos de prova de concreto: (a) pesagem do corpo de prova de concreto; (b) medição do diâmetro; (c) enumeração dos corpos de prova.



**Tabela 1** – Características físicas dos corpos de prova de concreto.

CpC°	Peso (kg)	Diâmetro médio (mm)	Comprimento médio (mm)
1	3,715	99,91	200,65
2	3,625	100,32	199,88
3	3,693	99,86	201,43

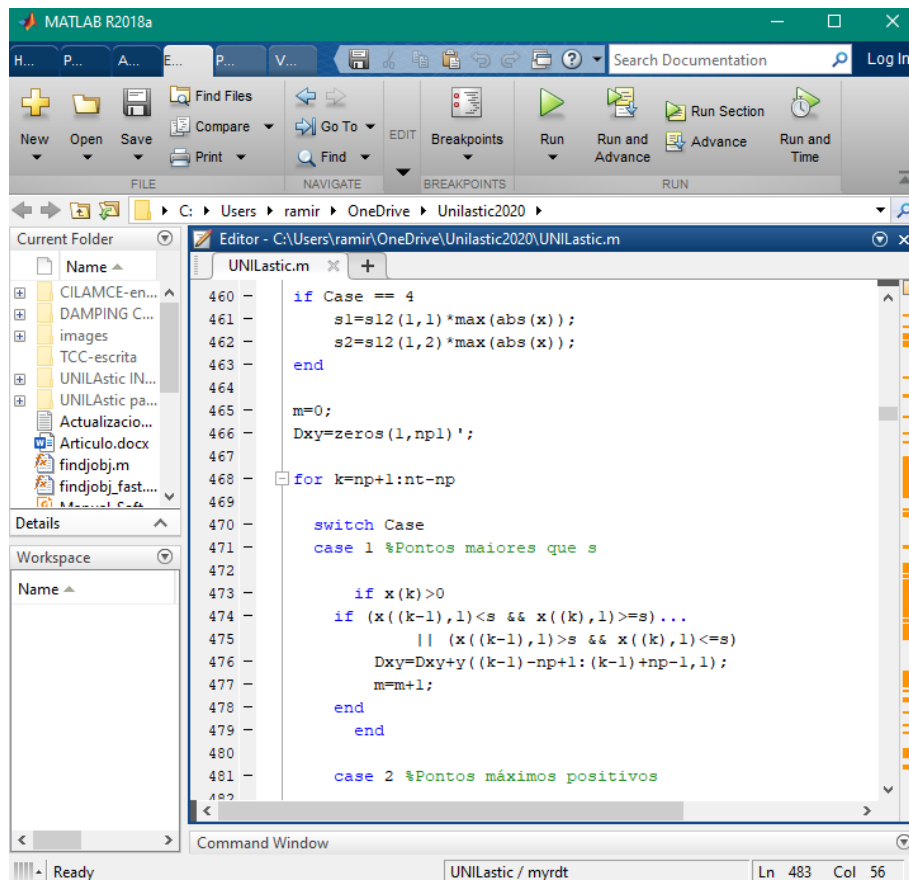
## 4.2 Módulo *Damping Curve*

Para que fosse possível obter o sinal *RD* foi realizada a implementação computacional do MDR. Para tal, desenvolveu-se em linguagem MATLAB® compatível com o sistema operacional Microsoft Windows®, o módulo *Damping Curve* no *software* UNILastic desenvolvido pelo autor de dessa pesquisa. Quanto ao método de estimativa do amortecimento, foram programados os métodos DL e ajuste de curva dentro do módulo *Damping Curve*. As condições de passagem de nível utilizadas foram:

- Quanto a seleção da condição de amplitude ( $q_0$ ): foram definidos subintervalos de 0,01 em um intervalo compreendido entre  $0,1 \times \text{maxAmpl}$  e  $0,75 \times \text{maxAmpl}$ . Para cada um desses subintervalos de amplitude foi definida: a) a função *RD*; b) a estimação do espectro meia potência usando o método de Welch; c) a resposta livre em decaimento de um S1GL a partir de aplicar a transformada inversa de Fourier entorno da frequência de ressonância; d) a função de transferência de um S1GL a partir de aplicar a transformada de Fourier; e) a taxa de amortecimento aplicando o método de ajuste de curva;
- Quanto ao cálculo da média na função *RD*: no mínimo 10 segmentos de tempo devem ser obtidos para a condição da resposta para cada amplitude, caso esse número de segmentos não fosse satisfeito, automaticamente adotou-se o valor zero para o amortecimento. Devido a uma quantidade de dados insuficientes;
- Quanto à região que dever ser selecionada para obter a resposta livre em decaimento de um S1GL usando a transformada inversa de Fourier): a seleção realizou-se de maneira manual com o auxílio de um *slider* (deslizador) no *software*, inicialmente o deslizador possui o valor igual a  $\pm 100$  Hz em relação a frequência selecionada, e cada vez que apertado o *slider* para a direita, o valor do intervalo entorno a região da frequência selecionada aumenta  $\pm 100$  Hz.

Nas **Figuras 9** e **10** são apresentadas respectivamente imagens referentes à tela (*user interface* - UI) gerada e a um dos códigos implementados na linguagem citada anteriormente.

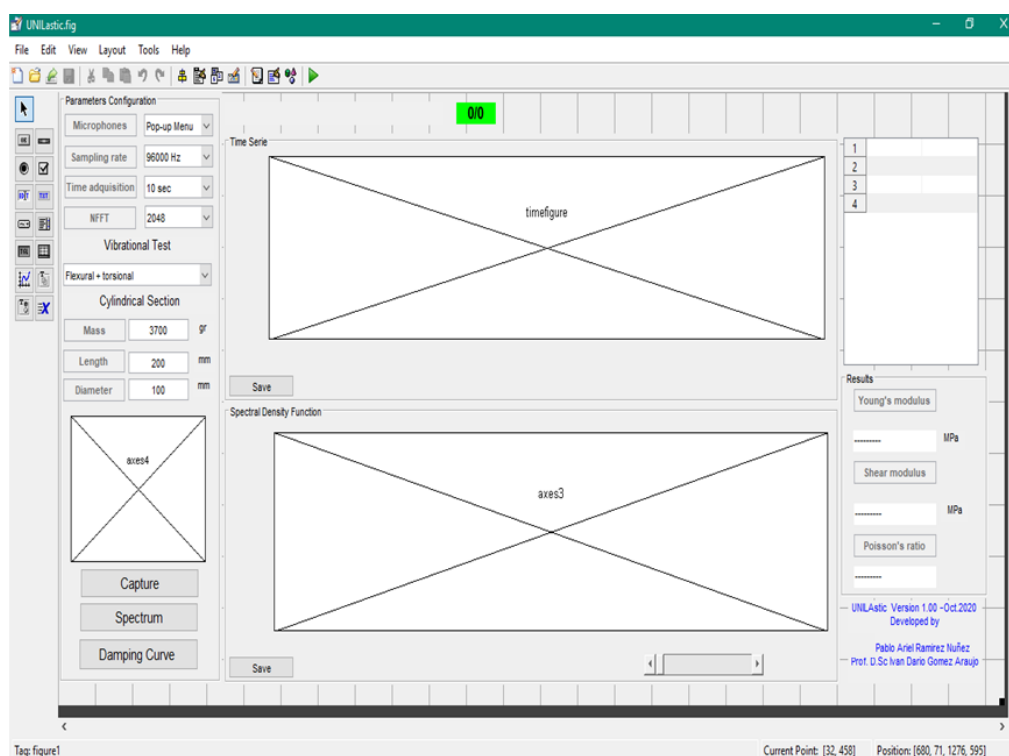
**Figura 9** – Implementação computacional do método de decremento randômico em linguagem MATLAB®.



```

460 -   if Case == 4
461 -       s1=s12(1,1)*max(abs(x));
462 -       s2=s12(1,2)*max(abs(x));
463 -   end
464
465 -   m=0;
466 -   Dxy=zeros(1,np1)';
467
468 -   for k=np+1:nt-np
469
470 -       switch Case
471 -       case 1 %Pontos maiores que s
472
473 -           if x(k)>0
474 -               if (x((k-1),1)<s && x((k),1)>=s)...
475 -                   || (x((k-1),1)>s && x((k),1)<=s)
476 -                   Dxy=Dxy+y((k-1)-np+1:(k-1)+np-1,1);
477 -                   m=m+1;
478 -               end
479 -           end
480
481 -       case 2 %Pontos máximos positivos
    
```

**Figura 10** – Desenvolvimento da interface gráfica do programa UNILastic no GUIDE - MATLAB®.

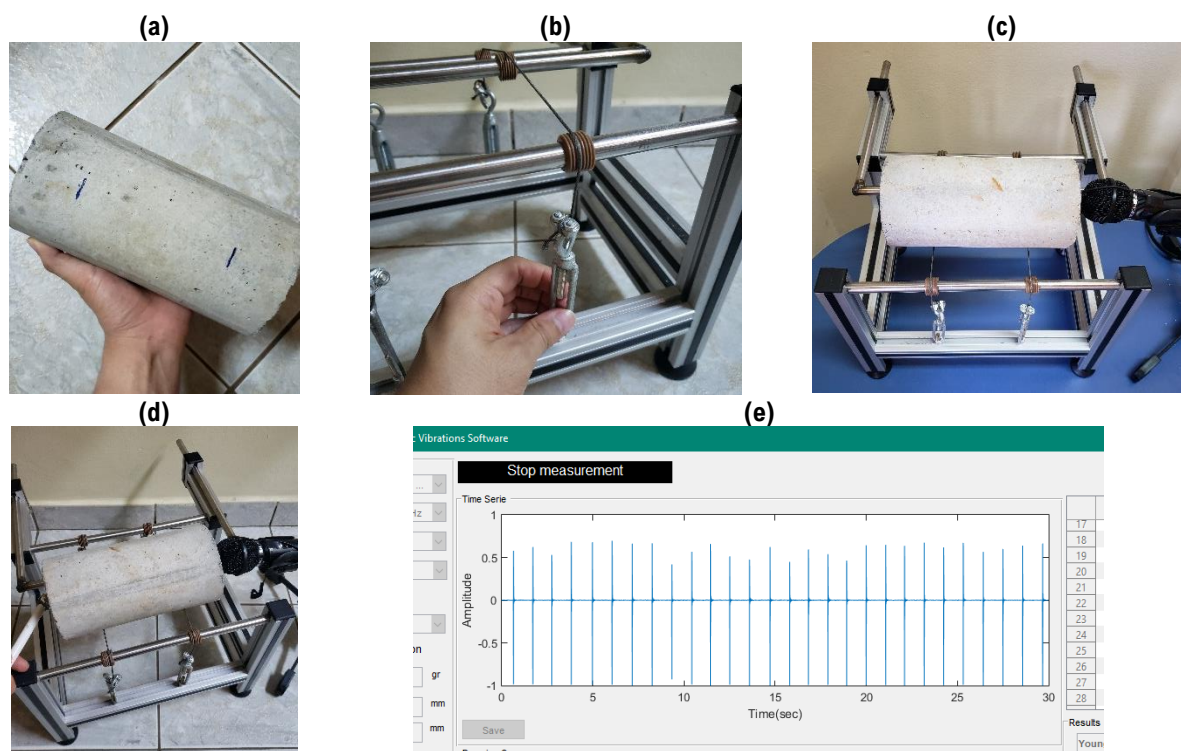


### 4.3 Ensaio pela TEI

Com o objetivo de avaliar a influência do dano no amortecimento do concreto foram realizados testes pela TEI com o auxílio do módulo *Damping Curve* do *software* e suporte UNILastic, onde foi possível estimar os valores de amortecimento dentro de um intervalo de amplitude. O registro de cada valor estimado confere aos pontos a impressão de uma curva, que caracteriza o estado ou condição em que se encontram os corpos de prova.

A montagem do ensaio iniciou-se pela localização dos pontos de apoio na lateral dos corpos de prova, com o auxílio de um paquímetro. Posteriormente foram feitas marcas com marcador permanente nesses nós. Sobre o suporte UNILastic, ajustou-se o conjunto de cabos de acordo a cada nó para cada corpo de prova e o microfone foi posicionado em uma das extremidades do corpo de prova a ser ensaiado contrário a posição de excitação do mesmo. Ainda acerca do suporte UNILastic, apresenta-se no **Apêndice A** o manual de construção do mesmo e no **Apêndice B**, os custos de fabricação.

**Figura 11** – Ensaio pela TEI: (a) marcação dos nós de ressonância; (b) ajuste dos cabos de aço do suporte UNILastic; (c) posicionamento do microfone e o corpo de prova no suporte UNILastic; (d) aplicação da excitação com o DIML; (e) registro da resposta acústica por parte do módulo *Damping Curve*.

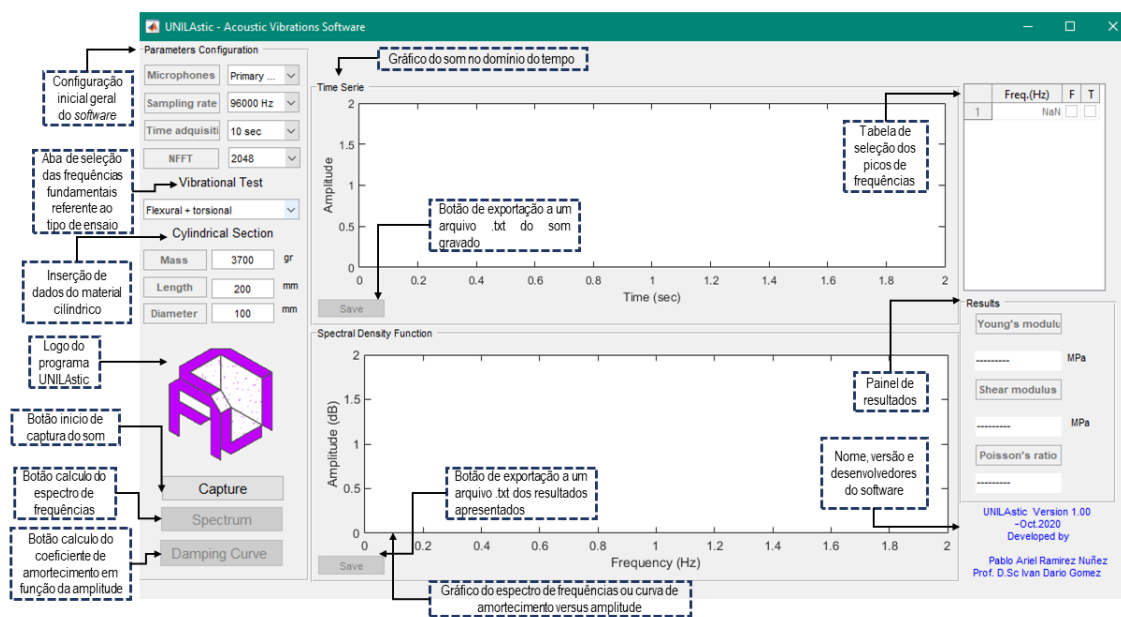


Para a realização do ensaio, utilizou-se o microfone Samsung® EHS61ASFBE. Os corpos de prova foram excitados com o Dispositivo de Impulso Manual Leve (DIML) e tomou-se o cuidado de que as vibrações geradas a partir dos golpes aplicados não sobrepujassem umas com outras. Foram realizadas cinco repetições do ensaio em cada corpo de prova, visando caracterizar vários possíveis comportamentos da resposta devido as incertezas de vários parâmetros que podem influenciar o resultado no do ensaio. A resposta acústica foi registrada pelo módulo *Damping Curve*. O procedimento para a estimativa do amortecimento com o módulo *Damping Curve* apresenta-se a seguir.

#### 4.3.1 Tutorial do módulo *Damping Curve*

Ao ser aberto, a interface do programa UNILastic é mostrada na **Figura 12**. Como observa-se, nesta tela o usuário deve inserir informações para que seja feito o cálculo do módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson e a curva de amortecimento *versus* amplitude. Para mais informações sobre os outros módulos do programa UNILastic, recomenda-se a leitura do artigo publicado por Ramirez Nuñez e Gomez Araujo (2020).

Figura 12 – Tela principal do UNILastic.



Legenda: *Parameter Configuration*: Configuração dos parâmetros; *Microphones*: Microfones; *Sampling rate*: Frequência de amostragem; *Time acquisition*: Tempo de captura; *NFFT*: Número de dados da FFT; *Vibrational Test*: Ensaio vibracional; *Cylindrical Section*: Seção cilíndrica; *Mass*: Massa; *Length*: Comprimento; *Diameter*: Diâmetro; *Capture*: Captura/Início; *Spectrum*: Espectro; *Damping Curve*: Curva de amortecimento; *Results*: Resultados; *Young's Modulus*: Módulo de elasticidade; *Shear Modulus*: Módulo de cisalhamento; *Poisson's ratio*: Coeficiente de Poisson; *Amplitude*: Amplitude; *Frequency*: Frequência; *Time Serie*: Série temporal; *Spectral Density Function*: Densidade espectral; *Time*: tempo.

Como dados de entrada do programa, é necessário digitar todas as características físicas do corpo de prova na aba “*Parameter configuration*”. Ademais, o usuário deve informar o tempo de gravação, microfone, entre outras configurações. Uma vez que todos os dados de entrada são fornecidos, é selecionado o tipo de ensaio “*Damping Curve*” e a seguir aperta-se o botão “*Capture*” para dar início ao ensaio. Nesse momento o algoritmo é chamado a realizar todos os cálculos; quando aparecer a mensagem “*Stop measurement*” é informado a finalização do ensaio gerando na parte superior da tela um gráfico que apresenta o som gravado pelo microfone e na parte inferior esquerda habilita-se a opção “*Spectrum*” (Figura 13). Para a determinação da curva, primeiramente aperta-se o botão “*Spectrum*” e escolhe-se um pico de frequência na tabela superior direita, além de definir os limites do pico que definem o S1GL com ajuda de uma barra deslizante que aparece somente ao ser selecionada a frequência (Figura 14). Em seguida, aperta-se o botão “*Damping Curve*” e então informa-se na parte superior da tela o andamento do cálculo para finalmente, na parte inferior da tela, apresentar-se a curva (Figura 15). Caso necessite salvar o resultado, pode-se gerar um arquivo de extensão .txt apertando o botão “*Save*”.

Figura 13 – Tela principal do UNILastic apresentando o som gravado.

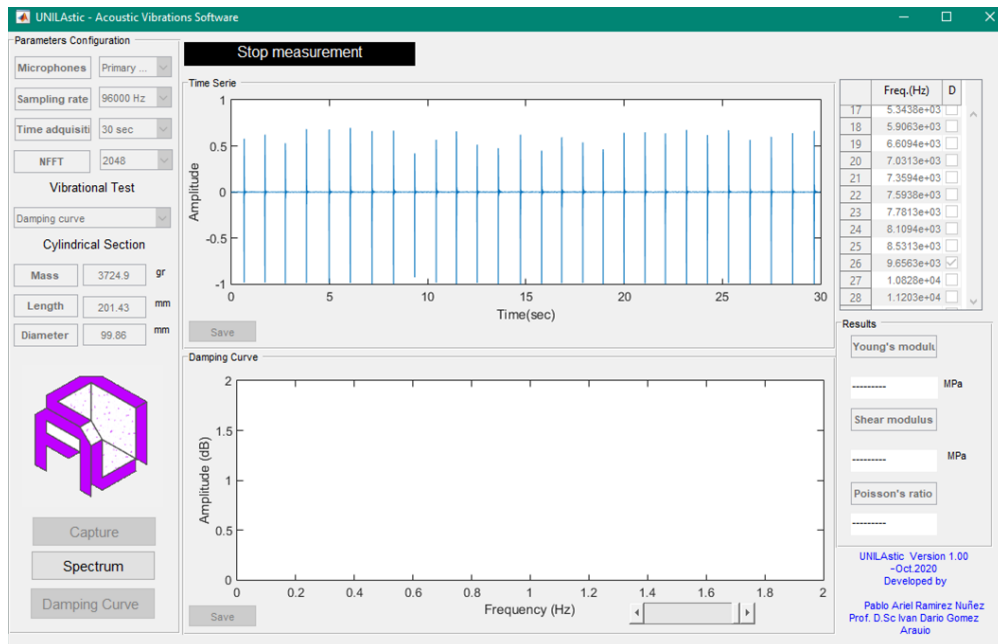
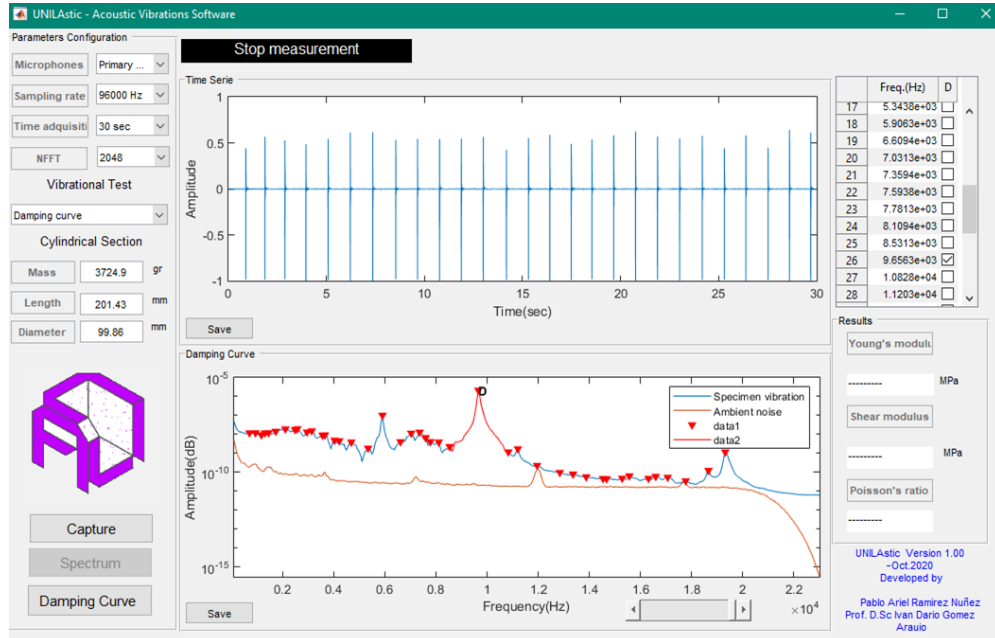


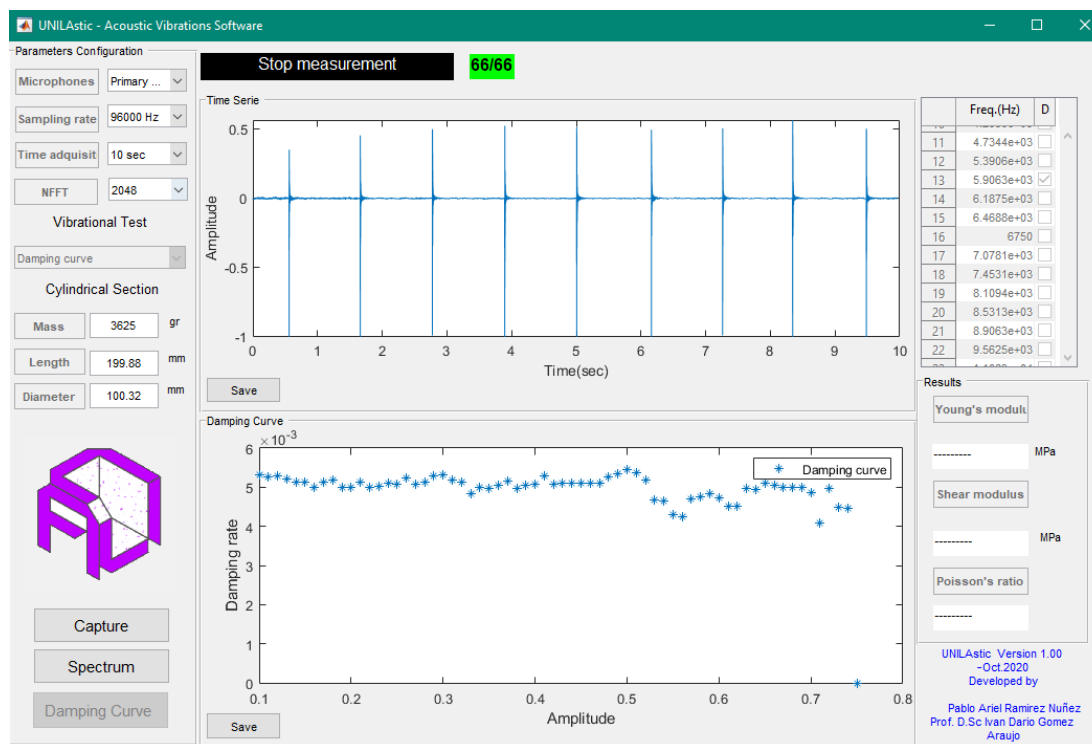
Figura 14 – Resultado obtido através do UNILastic, apresentando a densidade espectral da amostra ensaiada.



Legenda: *Specimen vibration*: Espectro da resposta acústica gravada no ensaio; *Ambient noise*: Espectro do som do ambiente.



**Figura 15** – Resultados obtidos do módulo *Damping Curve* para traçar a curva de amortecimento *versus* amplitude da amostra ensaiada para o pico de frequência selecionado.



#### 4.4 Definição dos critérios de ensaio

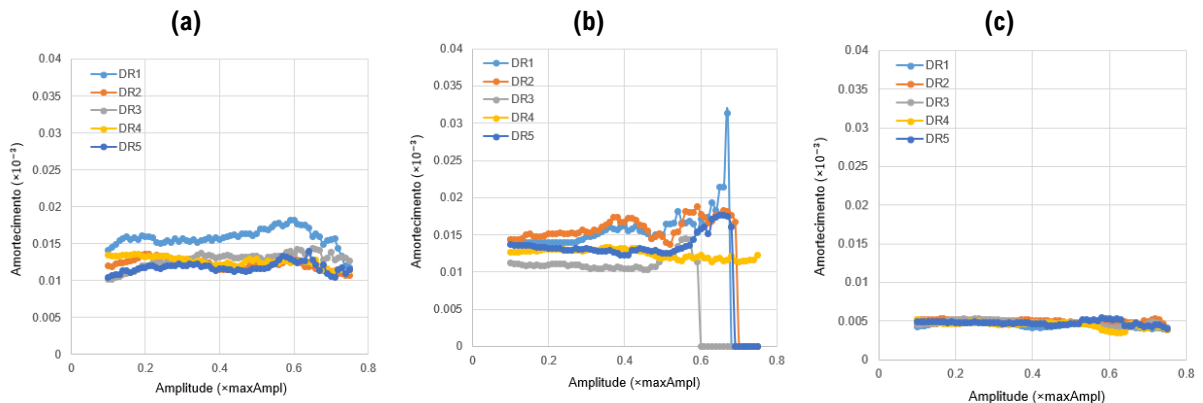
Em particular para esse trabalho, identificou-se a necessidade de estabelecer pré-requisitos importantes para a realização dos ensaios (*e.g.*, tempo de gravação, segmento de amplitude, pontos de excitação sobre os corpos de prova), visando eliminar qualquer possibilidade de subestimar ou sobre-estimar o amortecimento, conseqüentemente garantindo a repetibilidade do ensaio (*i.e.*, uma maior confiabilidade para os resultados). Apresenta-se a seguir a metodologia utilizada para a determinação das condições iniciais de ensaio a serem aplicadas a todos os corpos de prova.

##### 4.4.1 Avaliação dos pontos de aplicação da excitação

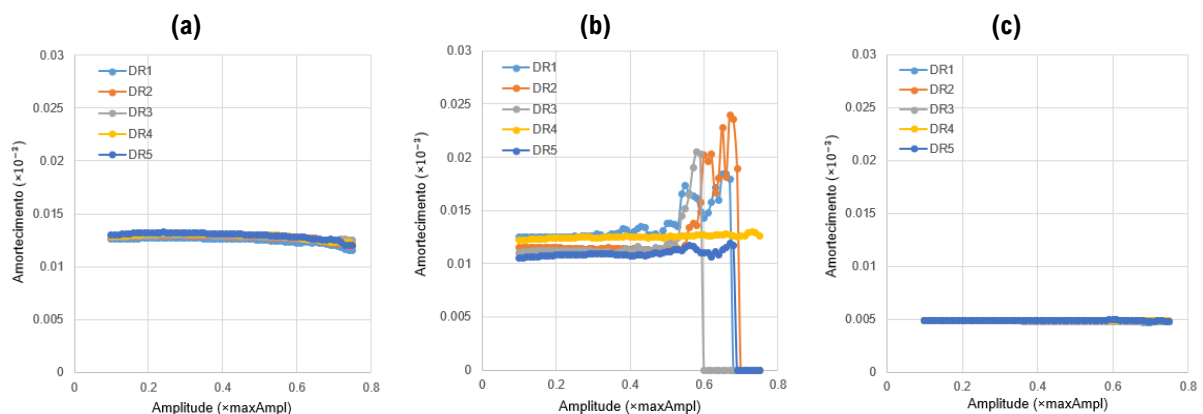
Foram realizadas cinco repetições do ensaio pela TEI em três regiões do corpo de prova 2 durante 10 segundos, visando definir se, independentemente do ponto de aplicação da excitação, a curva de amortecimento *versus* amplitude não varia. As regiões que foram excitadas são: (1) o centro da base do corpo de prova; (2) toda a base do corpo de prova; (3) toda a lateral do corpo de prova. Observa-se nas **Figuras 16 e 17** que a aleatoriedade da excitação no corpo de prova, afeta os resultados da estimativa do amortecimento, nas frequências 5859,4

Hz e 9562,5 Hz. Assim, determinou-se o centro da base dos corpos de prova como sendo o ponto de excitação com o DIML.

**Figura 16** – Resultados da curva taxa de amortecimento *versus* amplitude para diferentes pontos de excitação na frequência igual a 5859,4Hz: (a) golpes aleatórios na base; (b) golpes aleatórios na lateral; (c) golpes no centro da base.



**Figura 17** – Resultados da curva taxa de amortecimento *versus* amplitude para diferentes pontos de excitação na frequência igual a 9562,5Hz: (a) golpes aleatórios na base; (b) golpes aleatórios na lateral; (c) golpes no centro da base.

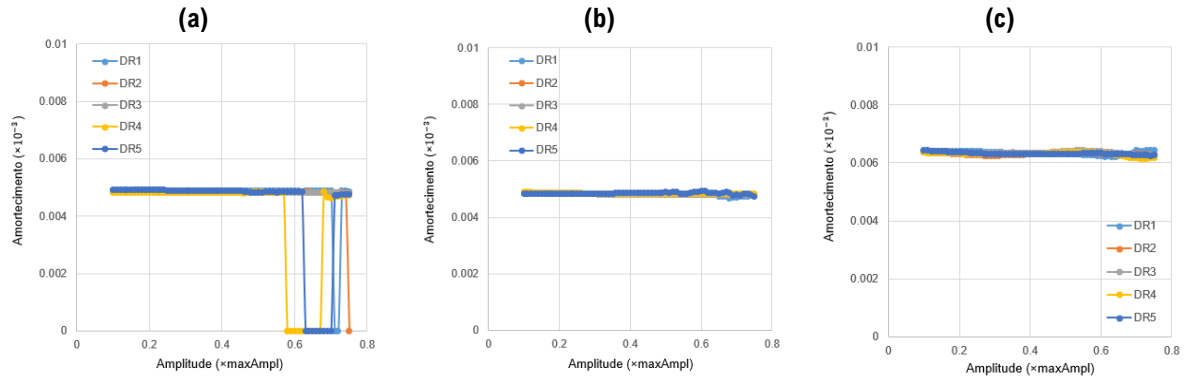


#### 4.4.2 Avaliação do tempo de aquisição do sinal

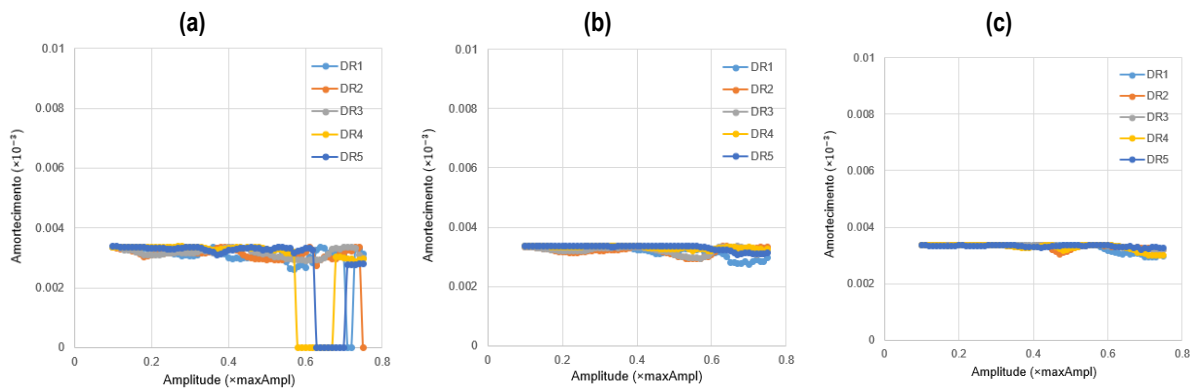
De acordo com a condição mínima de 10 seções estabelecidos para o cálculo da média, no método de decremento randômico, procedeu-se a determinar o tempo mínimo de aquisição da resposta acústica. Para isto, foi necessário a realização de ensaios pela TEI ao corpo de prova 2, repetindo três vezes com duração de tempo igual a 10 segundos, 30 segundos e 50 segundos; após finalizado o ensaio, os resultados foram salvos e realizou-se os gráficos para cada tempo de gravação citada anteriormente, os quais pode-se observar nas **Figuras 18 e 19** para dois picos de frequência. O tempo de gravação de 10 segundos foi descartado, pois evidenciou-se que o período de gravação é insuficiente para a estimativa do amortecimento para certas amplitudes, por outro lado, nota-se que o tempo de aquisição do sinal igual a 30

segundos e 50 segundos apresentam gráficos similares. Assim, optou-se por selecionar o tempo de aquisição da resposta acústica igual a 30 segundos.

**Figura 18** – Resultados da curva taxa de amortecimento *versus* amplitude para diferentes tempos de gravação na frequência igual a 9562,5 Hz. (a) 10 segundos; (b) 30 segundos; (c) 50 segundos.



**Figura 19** – Resultados da curva taxa de amortecimento *versus* amplitude para diferentes tempos de gravação na frequência igual a 11016Hz. (a) 10 segundos; (b) 30 segundos; (c) 50 segundos.

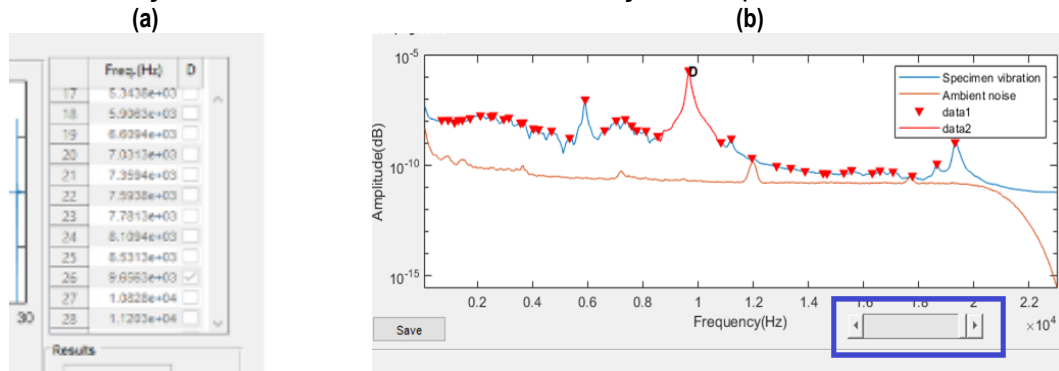


#### 4.4.3 Avaliação da região entorno da frequência selecionada(L)

O sistema analisado é um sistema correspondente a um SNGL, no entanto os métodos utilizados que analisam o amortecimento são feitos para S1GL. Se é considerado que o amortecimento é baixo menor que 10% é os modos de vibração são bem separados pode-se considerar que a região entorno das frequências de ressonância podem ser modelados como um S1GL. Dessa forma deve-se selecionar uma região próxima da frequência de ressonância que não seja influenciada por outros modos de vibração para evitar sobre-estimar ou subestimar o amortecimento. Por cada corpo de prova ensaiado foram selecionados três picos de frequências e definiu-se uma região próxima à frequência de ressonância, tal que não apresente

a possível a influência de outros modos. Como exemplo, apresenta-se na **Figura 20** a seleção de picos de frequências com os seus respectivos intervalos para o corpo de prova 2.

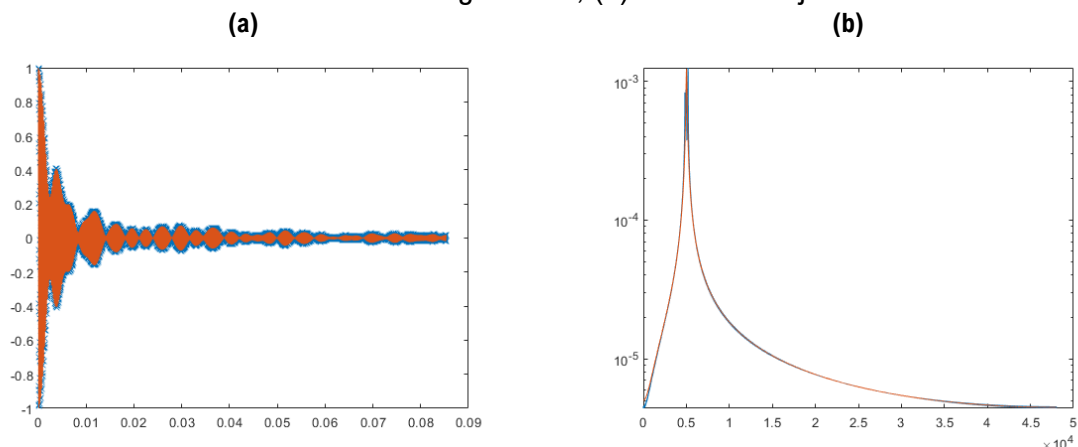
**Figura 20** – Resultados da curva taxa de amortecimento *versus* amplitude para diferentes tempos de gravação na frequência igual a 9656,3Hz. (a) seleção do pico de frequência; (b) definição do intervalo com o *slider* em relação a frequência selecionada.



#### 4.4.4 Avaliação do método para estimar o amortecimento

Para determinar o método de estimativa do amortecimento, foram realizados três ensaios e os resultados da curva resultantes dos métodos decremento logarítmico e ajuste de curva, comparados. Após realizada a comparação dos resultados, procedeu-se a utilizar e implementar no módulo *Damping Curve* o método de ajuste de curva, devido a que o modelo de amortecimento viscoso não pôde se garantir nos ensaios, tendo em vista que na literatura faz-se destaque a que o amortecimento é um fenômeno complexo e está diretamente relacionado à faixa de amortecimento em análise e da frequência de vibração do material. Na **Figura 21** observa-se as diferenças na resposta em vibração livre por ambas metodologias.

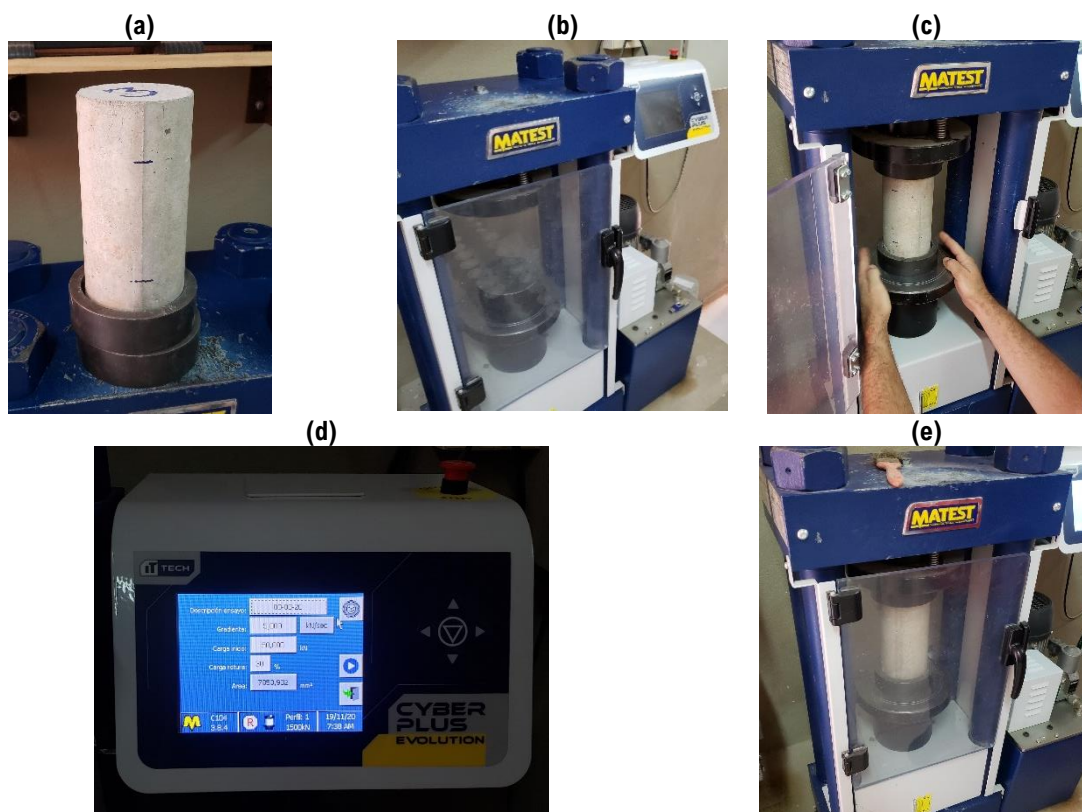
**Figura 21** – Resultados das curvas representando a resposta livre do sistema pelo: (a) método do decremento logarítmico; (b) método de ajuste da curva.



#### 4.5 Danificação dos corpos de prova

A fim de entender como afeta o dano ao amortecimento do concreto, foram aplicados aos três corpos de prova cargas de compressão. Para a aplicação das cargas, os corpos de prova foram levados ao laboratório de tecnologia do concreto da empresa Hormipar S.A. Optou-se por aplicar três valores de carga, aproximadamente iguais, para todos os corpos de prova. As cargas foram aplicadas utilizando a máquina de compressão de concreto automática da marca MATEST, em três dias diferentes: 19 de novembro, 20 de novembro e 26 de novembro de 2020. Adicionalmente, uma vez finalizada a aplicação de carga foram obtidos os registros das curvas de carga *versus* tempo registrados pelo equipamento. Após a aplicação da carga em cada data citada anteriormente, realizou-se o registro fotográfico a fim de constatar que os mesmos não apresentem danos visíveis. Em cada data do ensaio, os corpos de prova foram ensaiados pela TEI e os resultados registrados, conforme os procedimentos descritos na seção anterior. A execução do procedimento de danificação dos CpC° ilustra-se na **Figura 22**.

**Figura 22** – Processo de danificação do corpo-de-prova: (a) disposição do prato de aço nas faces do corpo-de-prova; (b) equipamento MATEST para realização de ensaio de resistência a compressão; (c) centralização do corpo-de-prova dentro do equipamento; (d) configuração do equipamento MATEST para após finalizado o carregamento, salvar o registro de carga; (e) aplicação da carga em andamento.

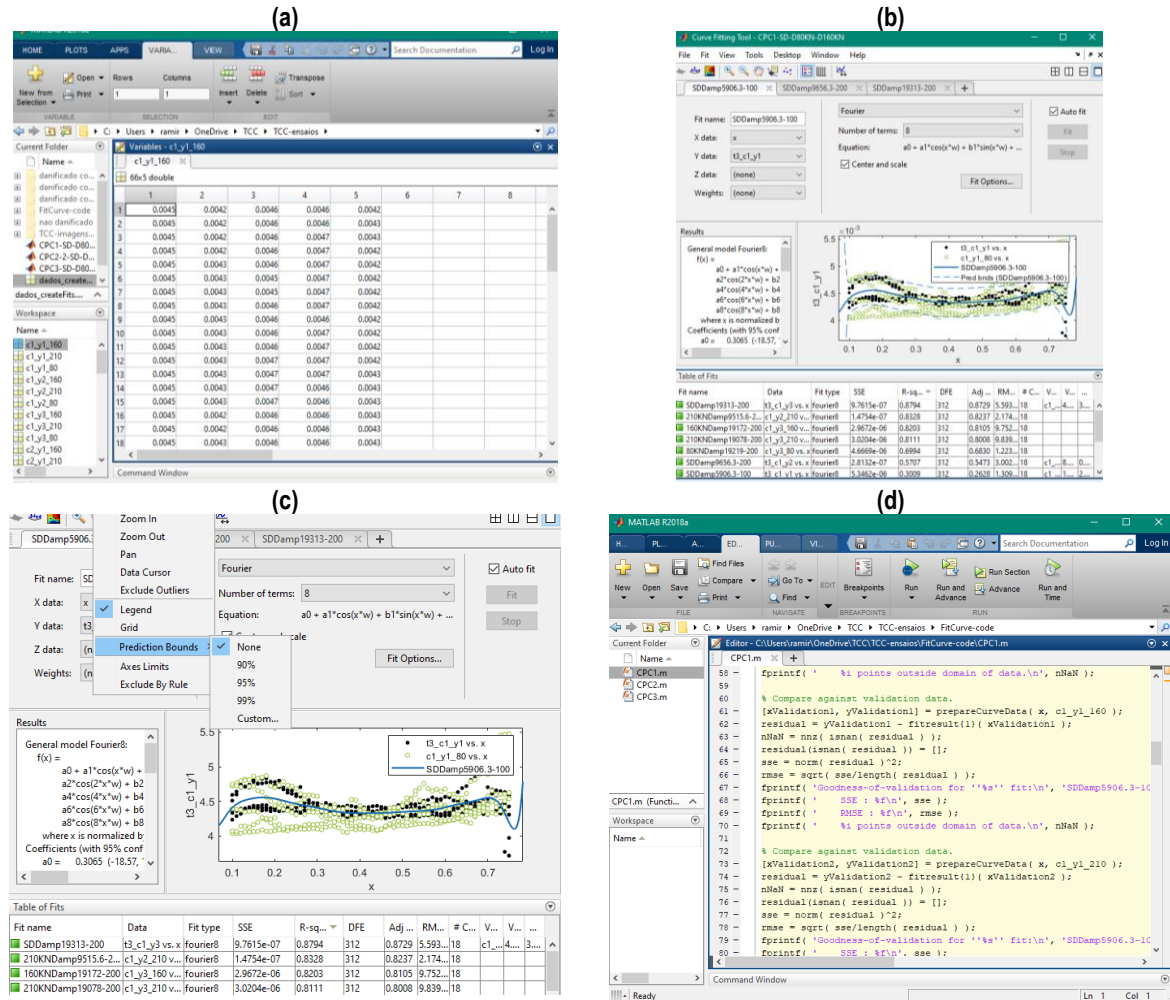


Por fim, após o registro dos resultados, os dados foram exportados ao programa *Curve Fitting Toolbox™* do MATLAB, para analisar as curvas correspondentes às três cargas aplicadas e ao estado não danificado, e o código do programa foi modificado. Outro parâmetro verificado foi a frequência. Para tanto, foram analisados os valores de pico de frequência selecionados a cada carga aplicada em cada corpo de prova, para compará-los entre si.

#### 4.6 Avaliação do dano no amortecimento do concreto

Dentro da aplicação *Curve Fitting Toolbox™* de MATLAB, procedeu-se a carregar os resultados de todos os testes realizados para cada frequência de cada corpo de prova (**Figura 23a**). Assim, verificou-se o valor do quadrado do coeficiente de correlação, ou  $R^2$ , dos resultados obtidos em cada frequência, o que permitiu indicar que a tendência dos pontos na curva de amortecimento *versus* amplitude efetivamente representa o comportamento no estado não danificado dos corpos de prova. O modelo de polinômios de Fourier com 8 termos foi utilizado para o ajuste da curva aos pontos. Nota-se que em algumas frequências, como por exemplo a 5906,3 Hz (**Figura 23b**), não foram possíveis obter valores de  $R^2$  maiores a 0,5 apesar de ter-se realizado mais de cinco repetições, no entanto, devido à natureza aleatória do ensaio, procedeu-se adicionalmente a definir com um nível de confiança igual a 95% (**Figura 23c**), um intervalo de confiança para a condição não danificada em cada um dos três picos de frequência em cada corpo de prova. Com o intuito de poder comparar mais de um resultado de carga com o estado não danificado, procedeu-se a modificar o código original do aplicativo (**Figura 23d**).

**Figura 23** – Avaliação dos resultados com o aplicativo *Curve Fitting Toolbox™* modificado: (a) exportação dos registros pertencentes as curvas geradas no módulo *Damping Curve*; (b) registro dos resultados do corpo de prova no *Curve Fitting Toolbox™*; (c) Seleção do nível de confiança igual a 95%; (d) código modificado do aplicativo *Curve Fitting Toolbox™*.



## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados quantitativos obtidos por meio do ensaio pela TEI proposto na metodologia do trabalho, de modo que seja possível avaliar a influência do dano no amortecimento de corpos de prova cilíndricos de concreto, antes e após serem submetidos a diferentes valores de carga. Também serão apresentados registros obtidos no decorrer da aplicação de cargas e imagens após a realização de todos os ensaios a fim de complementar o estudo. Para leitura e interpretação dos resultados gráficos, convencionou-se a utilização do termo “SD” para se referir ao corpo de prova no estado não danificado e o termo “C-SD” para se referir a curva que se ajusta ao registro de pontos. Da mesma forma, para cada corpo de prova tem-se o termo “5906.3-100” para se referir a frequência 5906,3 Hz.

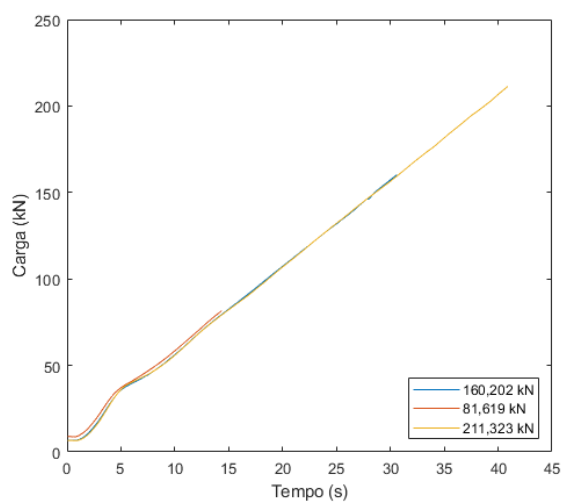
### 5.1 Análise das frequências

Os registros de cargas aplicadas aos corpos de prova em função do tempo são apresentados na **Figura 24**. Devido à falta do instrumento de medição, não foi possível registrar as curvas de tensão-deformação dos corpos de prova. No entanto, verificou-se que apesar de os corpos de provas não apresentarem danos visíveis, e que não foram solicitados até a ruptura, procedeu-se a aplicar três valores de carga, sendo dois deles maiores a 50% do valor de carga última aplicado aos 7 dias. Desta forma, as amostras, experimentaram uma expansão das microfissuras sem chegar à ruptura. Vale lembrar que os resultados da resistência à compressão mostram que os corpos de prova atingiram 90% da resistência projetada, em consequência dos valores de cargas de ruptura aplicados a eles, descritos no **Anexo A**, portanto, é possível afirmar que os dois últimos valores de cargas aplicadas efetivamente correspondem a valores maiores de 50% do valor de carga de ruptura.

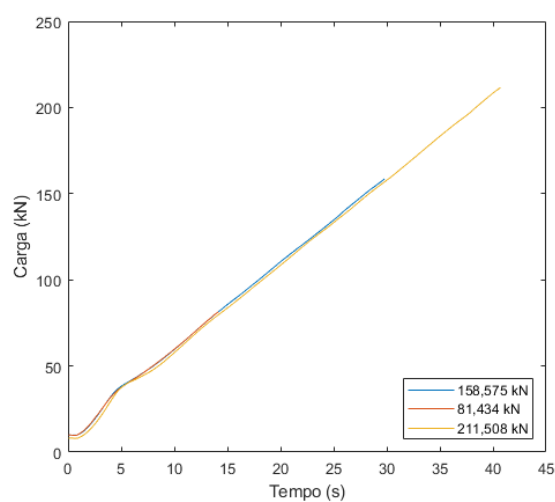


**Figura 24** – Registro dos valores de cargas aplicado ao: (a) corpo de prova 1; (b) corpo de prova 2; (c) corpo de prova 3.

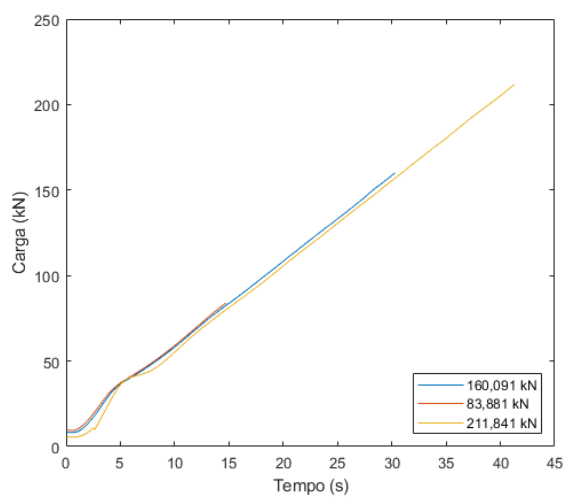
(a)



(b)

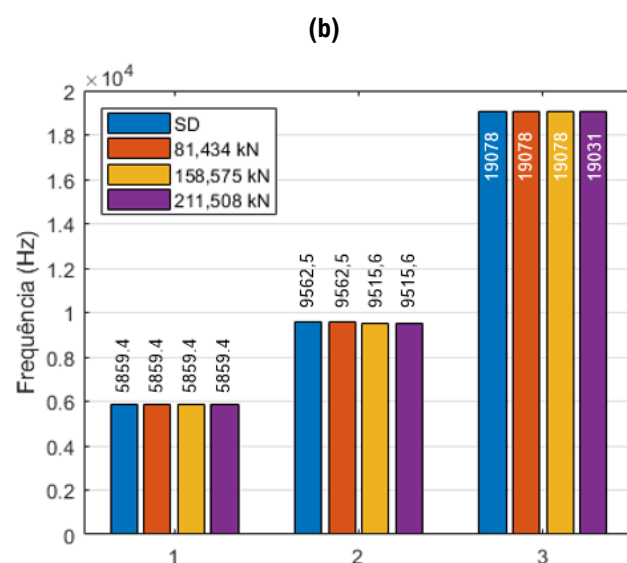
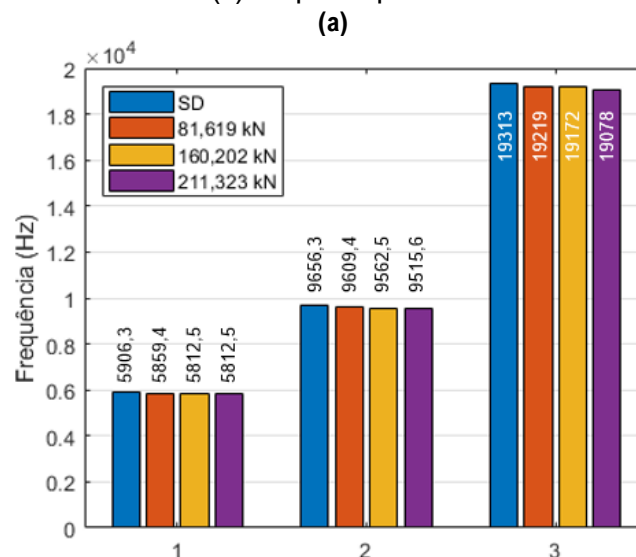


(c)

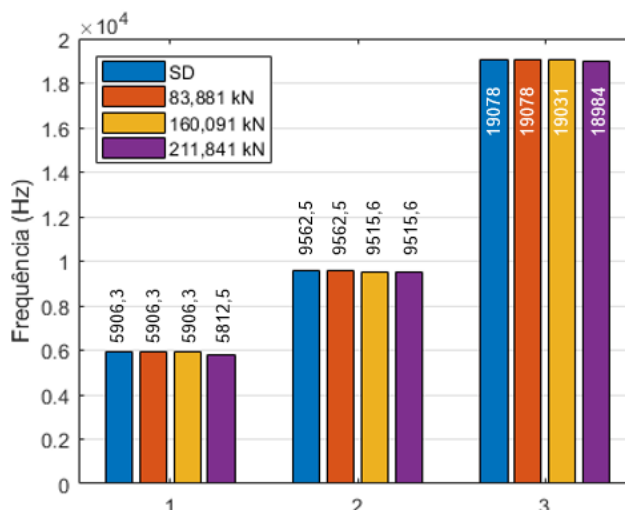


A variação dos picos de frequências após a aplicação de carga é apresentada na **Figura 25**. Após a aplicação da primeira carga é possível observar que as frequências do primeiro corpo de prova foram as únicas que apresentaram variações, provavelmente devido ao fato de que a carga aplicada ao corpo de prova não era suficiente para fazer com que ele exibisse comportamento não-linear. Adicionalmente, é possível observar a partir da segunda carga aplicada que as frequências diminuíram minimamente, em torno de 46,9 Hz a 235 Hz em alguns corpos de prova, com o aumento da carga aplicada. Convém notar que as duas últimas cargas aplicadas excedem 50% da carga de ruptura, de acordo com os resultados apresentados no **Anexo A** para os outros corpos de prova, especificamente aqueles pertencentes ao *Mixer 4*.

**Figura 25** – Variação dos picos de frequências: (a) corpo de prova 1; (b) corpo de prova 2; (c) corpo de prova.



(c)



Na **Tabela 2** a seguir são apresentadas as variações de frequências registradas, em porcentagem, para uma melhor visualização das diferenças apresentadas durante o trabalho.

**Tabela 2** – Variação percentual das frequências, conforme três valores de carga aplicados a cada corpo de prova respectivamente.

ID		SD	C1	C2	C3
CpC° 1	F1	0.000%	0.794%	1.588%	1.588%
	F2	0.000%	0.486%	0.971%	1.457%
	F3	0.000%	0.487%	0.730%	1.217%
CpC° 2	F1	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
	F2	0.000%	0.000%	0.490%	0.490%
	F3	0.000%	0.000%	0.000%	0.246%
CpC° 3	F1	0.000%	0.000%	0.000%	1.588%
	F2	0.000%	0.000%	0.490%	0.490%
	F3	0.000%	0.000%	0.246%	0.493%

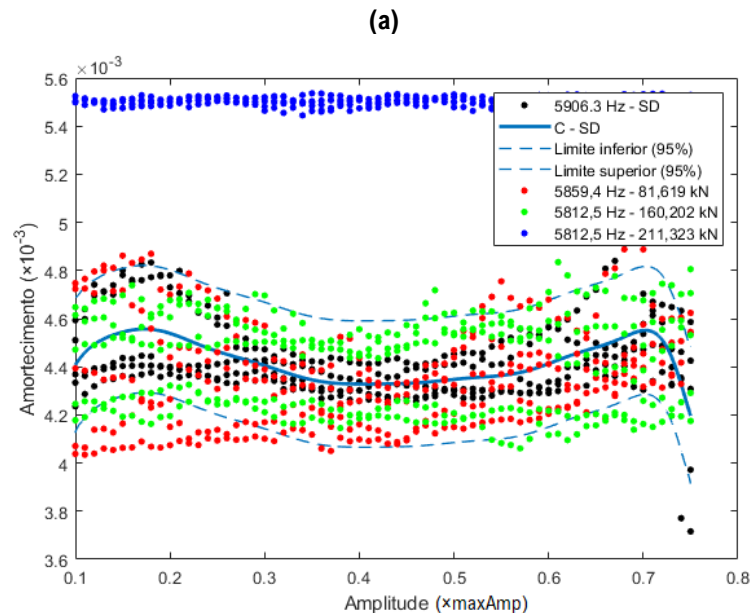
Legenda: ID – Identificação; SD – Condição não danificada; C1, C2, C3 – Primeira, segunda e terceira carga aplicada respectivamente; CpC° 1, CpC° 1, CpC° 1 – Corpo de prova de concreto 1, 2 e 3 respectivamente; F1, F2, F3 – Identificação da primeira, segunda e terceira frequência analisada respectivamente.

## 5.2 Análise das curvas amortecimento *versus* amplitude

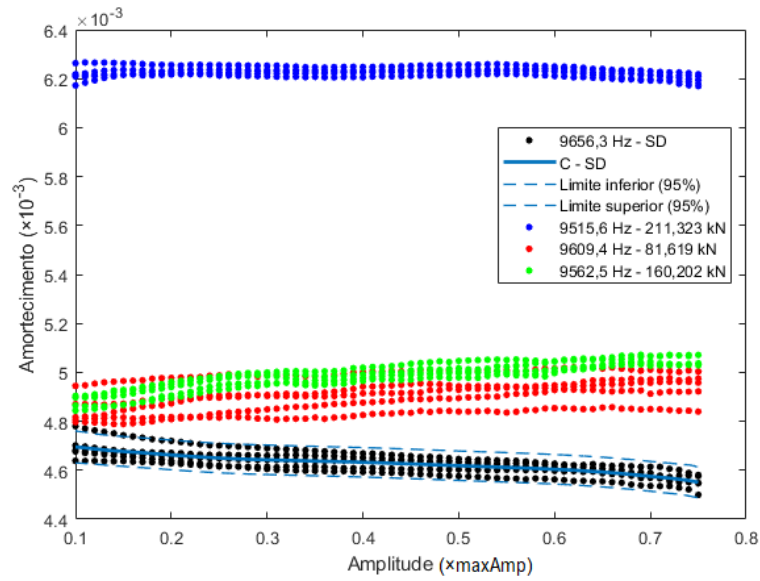
Na segunda análise realizada foi possível verificar de forma comparativa o aumento da taxa de amortecimento dos corpos de prova com o aumento de carga aplicada, principalmente para os dois primeiros picos de frequências. Passado o segundo pico de frequência, observa-se que a tendência da taxa de amortecimento não aumenta, no entanto, para todos os resultados após a aplicação da carga, os resultados não convergem dentro dos limites máximos e mínimos de confiança, indicando que, para um mesmo valor de força, a taxa de amortecimento pode apresentar também uma diminuição em função do pico de frequência.

Nos gráficos abaixo (**Figura 26**), pode-se observar a influência das cargas aplicadas na taxa de amortecimento do corpo de prova 1. Para as cargas de 81,619 kN e 160,202 kN registrou-se curvas muito próximas ao da condição não danificada. Ressalta-se que, quando registros similares de curvas foram obtidos (*i.e.*, muito próximas ao da condição não danificada), foi fundamental definir os limites de confiança, a fim de constatar variações advindas do processo de danificação nos corpos de prova de concreto. Por outra parte, note que para a carga de 211,323 kN ouve uma notória diferença em comparação aos registros anteriores, isto porque a carga aplicada aproximadamente chegou a 90% da carga última de ruptura, segundo os registros apresentados no **Anexo A**.

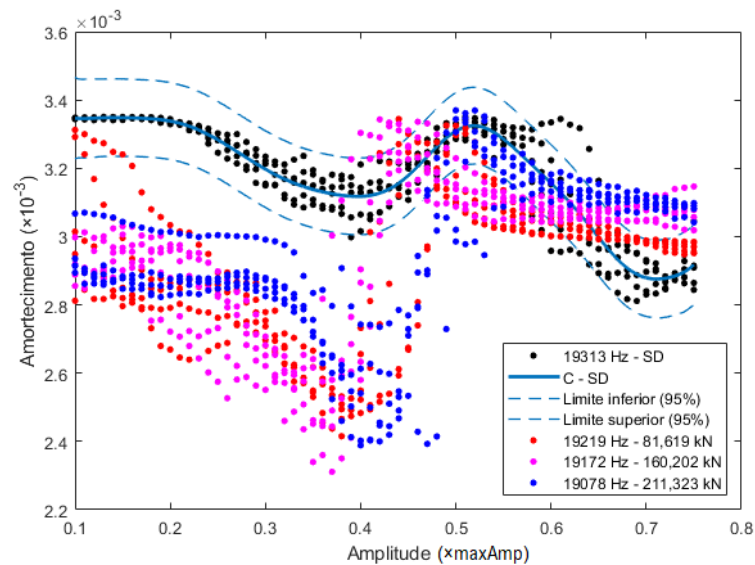
**Figura 26** – Resultados das curvas taxa de amortecimento *versus* amplitude para o corpo de prova 1: (a) 5906.3-100; (b) 9656,3-200; (c) 19313-200



(b)



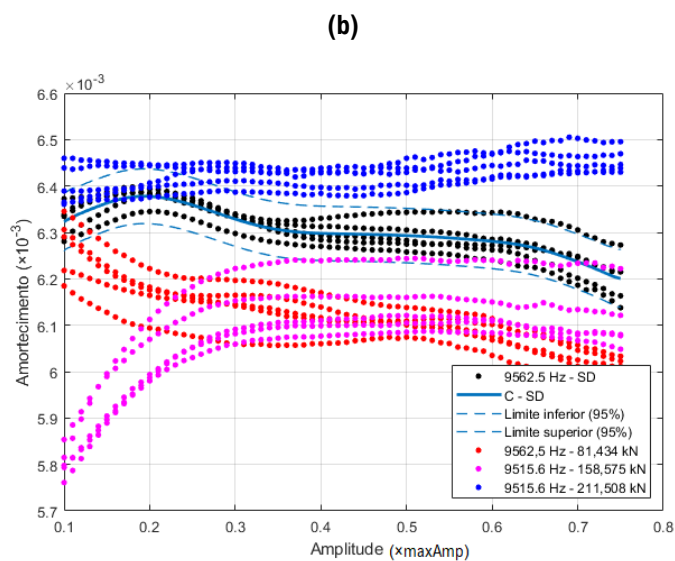
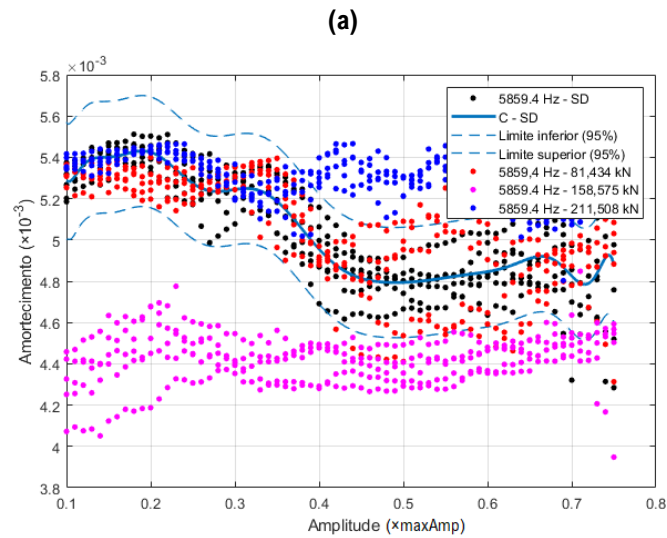
(c)



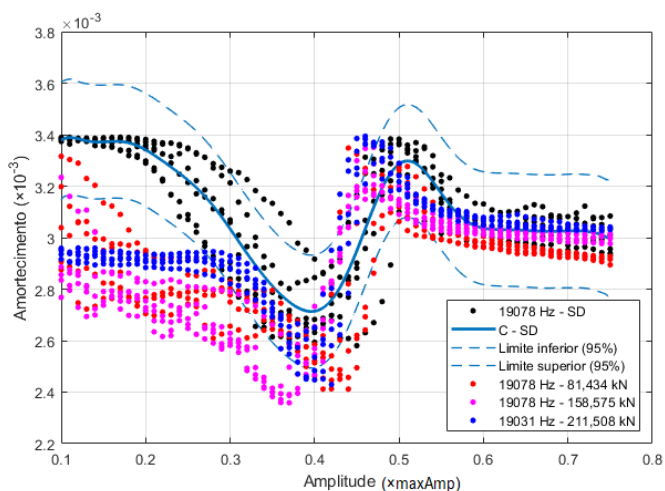
Da mesma maneira, para os corpos de prova 2 e 3, respectivamente, na **Figura 27** e na **Figura 28** observa-se um aumento da taxa de amortecimento conforme o aumento da carga. De fato, é possível observar que para o último pico de frequência analisado, em todos os corpos de prova, tem-se um platô de baixa amplitude seguida de uma faixa de transição e finalizando com um platô de alta amplitude, segundo a metodologia de trabalho adotado. Também vale salientar o fato de que, para a frequência de maior amplitude no espectro da resposta (*e.g.*, 9562.5 Hz para o CpC<sup>o</sup>2) maior o intervalo entorno a frequência ( $9562.5 \pm 300$  Hz), sem comprometer a estimativa da taxa de amortecimento, quer seja no sentido de subestimar ou sobre-estimar, com alta correlação de dados. Como exemplo, tem-se os resultados no corpo

de prova 1 na frequência 9515,6 Hz com carga aplicada igual a 211,323 kN, um valor de correlação de dados (ou  $R^2$ ) igual a 0,8328.

**Figura 27** – Resultados das curvas taxa de amortecimento *versus* amplitude para o corpo de prova 2: (a) 5859.4-100; (b) 9562.5-300; (c) 19078-200.

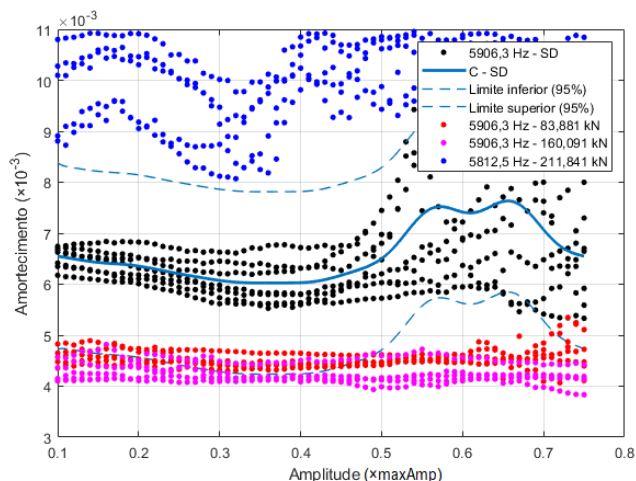


(c)

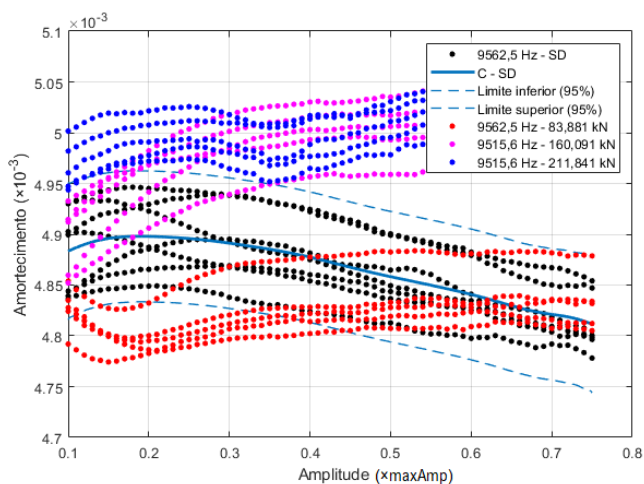


**Figura 28** – Resultados das curvas taxa de amortecimento *versus* amplitude para o corpo de prova 3: (a) 5906,3-200; (b) 9562.5-200; (c) 19078-200.

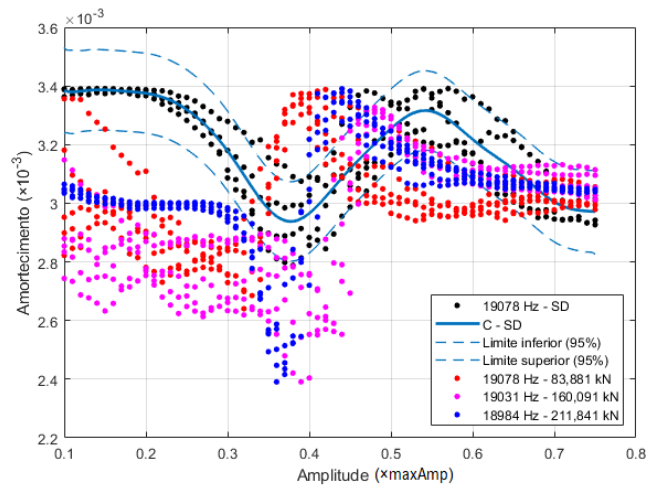
(a)



(b)

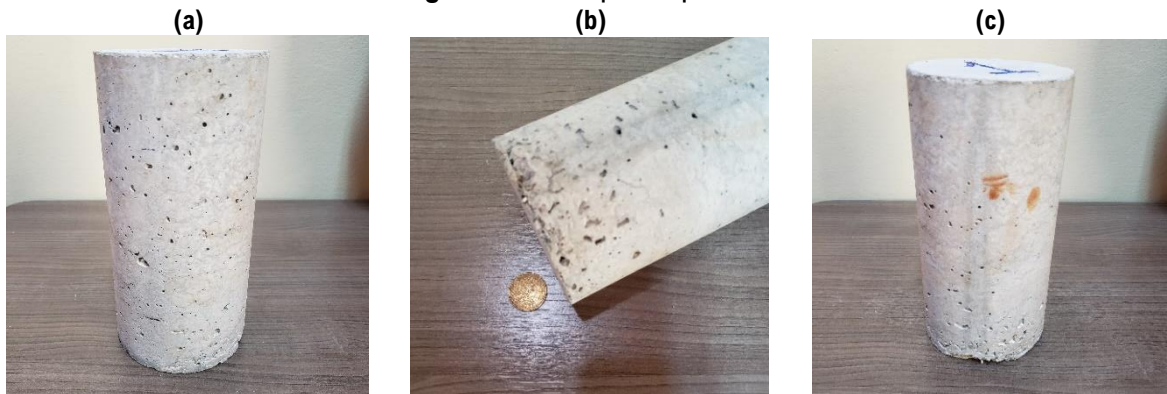


(c)

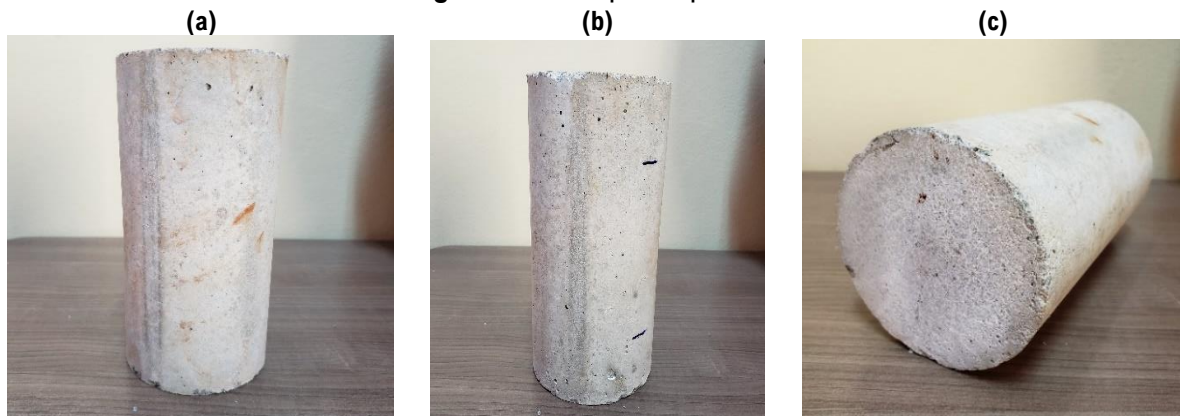


Nas **Figura 29**, **Figura 30** e **Figura 31** apresentam-se os registros fotográficos, após a aplicação da última carga.

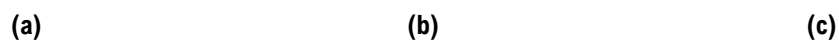
**Figura 29 – Corpo de prova 1**



**Figura 30 – Corpo de prova 2**



**Figura 31 – Corpo de prova 3**







## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, as seguintes considerações podem ser formuladas a partir deste trabalho:

a) Quanto à curva amortecimento *versus* amplitude:

- A determinação do valor de correlação ( $R^2$ ) da curva que melhor se ajusta aos pontos registrados, por meio do programa desenvolvido, apresenta-se como uma ferramenta de apoio para definir se os resultados obtidos representam a condição, danificada ou não danificada dos corpos de prova previamente ensaiados, segundo as metodologias e materiais empregados neste trabalho;
- Os resultados apresentados para todos os picos de frequências durante as fases de ensaios confirmam que avaliar o amortecimento em uma única frequência, a de máxima amplitude, é suficiente para avaliar as condições dos corpos de prova, minimizando os tempos de ensaios;
- Verificou-se que o tamanho do intervalo entorno da frequência de ressonância não pode ser modificado uma vez realizado o ensaio na condição não danificada, devido à subestimação ou superestimação nas taxas de amortecimentos;
- Comprovou-se que, para as frequências onde não foram possíveis obter curvas com um valor de  $R^2$  inferior a 0,5 o comportamento do fenômeno físico de amortecimento indica alta variabilidade, e a fim de avaliar e comparar com relação ao estado não danificado é necessário nesses casos determinar-se os limites superior e inferior de confiança com um nível de 95%;
- Ao comparar-se os parâmetros dinâmicos (amortecimento e frequência) em quanto a sua sensibilidade à presença de dano, é possível afirmar maior sensibilidade por parte do amortecimento, isto porque já com a primeira carga aplicada nota-se uma variação das curvas taxa de amortecimento *versus* amplitude, quando comparado às variações de frequências apresentadas nos corpos de prova, indicando que, aplicando os métodos e procedimentos descritos no trabalho, o amortecimento de forma eficaz reconhece a presença de dano, devido à fissuras internas, em corpos de prova cilíndricos de concreto;

- Diante das diversas metodologias que se encontram na literatura, foi possível determinar procedimentos e recomendações para a realização de ensaios em corpos de prova de concreto cilíndricos, validando com os resultados obtidos em pesquisas realizadas na área de detecção de danos por meio do amortecimento, utilizando o método de decremento randômico.

b) Quanto ao *software* desenvolvido:

- O módulo *Damping Curve* do *software* UNILAstic destaca-se por ser uma ferramenta computacional confiável em termos de algoritmo e simples para o usuário em termos de sua interface;
- O módulo não se limita apenas a realizar cálculos dentro de sua interface, mas também permite a exportação para outros programas com o intuito de analisar os resultados de forma mais aprofundada;
- O módulo *Damping Curve* auxiliará estudantes e pesquisadores, além de agregar conhecimento à área de detecção de dano em concretos.

Visando contribuir com a continuação desta linha de pesquisa, a seguir apresenta-se sugestões para trabalhos futuros:

- Acrescentar a opção de análise de resultados dentro do *software* UNILAstic, para o módulo *Damping Curve*, empregando o código modificado *Curve Fit*;
- Fabricar pequenas vigas de concreto armado, e estudar o comportamento do amortecimento em vigas biapoiadas sob flexão simples por meio do ensaio pela técnica de excitação por impulso;
- Realizar ensaios pela técnica de excitação por impulso, em pequenas vigas de concreto armado, e determinar se é possível localizar o dano, mediante o registro da variação da taxa de amortecimento em vários pontos;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADELI, H.; JIANG, X. Dynamic Fuzzy Wavelet Neural Network Model for Structural System Identification. **Journal of Structural Engineering**, [S. l.], p. 102-111, 1 jan. 2006. Disponível em: <https://bit.ly/3an2VMg>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- ADHIKARI, Sondipon. Models of Damping. *In*: ADHIKARI, Sondipon. **Damping Models for Structural Vibration**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Cambridge, [S. l.], 2000. Disponível em: <https://tinyurl.com/yxq3g97r>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- AGENNI, A.; CREMA, L. Analytic Signal in the Damping Coefficient Estimation. *In*: INTERNATIONAL CONF. ON SPACECRAFT AND MECHANICAL TESTING, 1989, Noordwijik, Países Baixos. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 1989. p. 133-139.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-15, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://bit.ly/39qocmK>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- ASMUSSEN, J. C. **Modal Analysis based on the Random Decrement Technique**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de Aalborg, [S. l.], 1997. Disponível em: <https://tinyurl.com/y45vk9ro>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- ASMUSSEN, J. C.; IBRAHIM, S. R.; BRINCKER, R. Random decrement: Identification of structures subjected to ambient excitation. *In*: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 16., 1998, California, EUA. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 1998. p. 914-921. Disponível em: <https://bit.ly/2RYHGZs>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Classical Dynamics. *In*: BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introduction to Operational Modal Analysis**. [S. l.: s. n.], 2015c. *E-book* (375 p.).
- BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Frequency-Domain Identification. *In*: BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introduction to Operational Modal Analysis**. [S. l.: s. n.], 2015f. *E-book* (375 p.).
- BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Introduction. *In*: BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introduction to Operational Modal Analysis**. [S. l.: s. n.], 2015a. *E-book* (375 p.).
- BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Random Variables and Signals. *In*: BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introduction to Operational Modal Analysis**. [S. l.: s. n.], 2015b. *E-book* (375 p.).
- BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Random Vibrations. *In*: BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introduction to Operational Modal Analysis**. [S. l.: s. n.], 2015d. *E-book* (375 p.).
- BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Signal Processing. *In*: BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introduction to Operational Modal Analysis**. [S. l.: s. n.], 2015e. *E-book* (375 p.).
- BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Transforms. *In*: BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introduction to Operational Modal Analysis**. [S. l.: s. n.], 2015g. *E-book* (375 p.).

BRINCKER, R.; ZHANG, L.; ANDERSON, P. Modal Identification from ambient response using frequency domain decomposition. *In: THE INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 2000, San Antonio, Texas, EUA. Proceedings [...]. [S. l.: s. n.], 2000. p. 625-630. Disponível em: <https://tinyurl.com/yy53mrka>. Acesso em: 6 nov. 2020.*

CAO, M. S. *et al.* Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features. **Smart Materials and Structures**, [S. l.], p. 1-14, 7 mar. 2017. Disponível em: <https://bit.ly/2x4DvVq>. Acesso em: 6 nov. 2020.

CAWLEY, P.; ADAMS, R. D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. **Journal of Strain Analysis**, [S. l.], p. 49-57, 1 abr. 1979. Disponível em: <https://bit.ly/2vVpw3A>. Acesso em: 6 nov. 2020.

CHEN, B.; XU, Y. L.; QU, W. L. Evaluation of atmospheric corrosion damage to steel space structures in coastal areas. **International Journal of Solids and Structures**, [S. l.], p. 4673-4694, 21 mar. 2005. Disponível em: <https://bit.ly/33StmXB>. Acesso em: 6 nov. 2020.

COLE, H. A. **On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures by random decrement signatures**. [S. l.: s. n.], 1973. Disponível em: <https://go.nasa.gov/3bukHNS>. Acesso em: 6 nov. 2020.

CUNHA, Á.; CAETANO, E. Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures. **Journal of Sound and Vibration**, [S. l.], p. 12-20, 1 jun. 2006. Disponível em: <https://bit.ly/3hGhuO6>. Acesso em: 29 jul. 2020.

CURADELLI, R. O. *et al.* Damage detection by means of structural damping identification. **Engineering Structures**, [S. l.], p. 3497-3504, 2 jul. 2008. Disponível em: <https://bit.ly/2Jg9xjo>. Acesso em: 6 nov. 2020.

DAVIS, A. G. The nondestructive impulse response test in North America: 1985-2001. **NDT&E International**, [s. l.], v. 36, p. 185-193, jun. 2003. Disponível em: <https://bit.ly/2pZiTd6>. Acesso em: 6 nov. 2020.

DOEBLING, S. W. *et al.* **Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review**. [S. l.: s. n.], maio 1996. Disponível em: <https://bit.ly/2Uma6yM>. Acesso em: 6 nov. 2020.

ELISHAKOFF, I. Elements of the Theory of Random Functions. *In: ELISHAKOFF, I. Probabilistic Methods in the Theory of Structures: Strength of Materials, Random Vibrations, and Random Buckling*. [S. l.: s. n.], 2017d. *E-book* (522 p.).

ELISHAKOFF, I. Examples of Probability Distribution and Density Functions. Functions of a Single Random Variable. *In: ELISHAKOFF, I. Probabilistic Methods in the Theory of Structures: Strength of Materials, Random Vibrations, and Random Buckling*. [S. l.: s. n.], 2017c. *E-book* (522 p.).

ELISHAKOFF, I. Probability Axioms. *In: ELISHAKOFF, I. Probabilistic Methods in the Theory of Structures: Strength of Materials, Random Vibrations, and Random Buckling*. [S. l.: s. n.], 2017a. *E-book* (522 p.).

ELISHAKOFF, I. Single Random Variable. *In: ELISHAKOFF, I. Probabilistic Methods in the Theory of Structures: Strength of Materials, Random Vibrations, and Random Buckling*. [S. l.: s. n.], 2017b. *E-book* (522 p.).

FARRAR, C. R. *et al.* **Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande.** [S. l.: s. n.], 1994. Disponível em: <https://bit.ly/2QO2hzL>. Acesso em: 6 nov. 2020.

FARRAR, C. R.; JAUREGUID, D. A. Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment. **Smart Materials and Structures**, [S. l.], p. 704-719, 14 jul. 1997. Disponível em: <https://bit.ly/3bvZJOK>. Acesso em: 6 nov. 2020.

FEENY, B. F.; LIANG, J. W. A decrement method for the simultaneous estimation of Coulomb and viscous friction. **Sound and Vibration**, [S. l.], p. 149-154, 1996. Disponível em: <https://tinyurl.com/y4s9ne7g>. Acesso em: 13 set. 2019.

FRANCHETTI, P.; MODENA, C.; FENG, M. Q. Nonlinear Damping Identification in Precast Prestressed Reinforced Concrete Beams. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [S. l.], p. 577-592, 14 set. 2009. Disponível em: <https://bit.ly/2QN20N8>. Acesso em: 6 nov. 2020.

FRIZZARIN, M. *et al.* Damage detection based on damping analysis of ambient vibration data. **Structural Control and Health Monitoring**, [S. l.], p. 368-385, 1 jan. 2010. Disponível em: <https://bit.ly/2wwjMO9>. Acesso em: 6 nov. 2020.

GIRDHAR, P. Data acquisition. *In*: GIRDHAR, P. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance.** [S. l.: s. n.], 2004b. *E-book* (264 p.).

GIRDHAR, P. Predictive maintenance techniques: Part 2 - Vibration basics. *In*: GIRDHAR, P. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance.** [S. l.: s. n.], 2004a. *E-book* (264 p.).

GIRDHAR, P. Signal processing, applications and representations. *In*: GIRDHAR, P. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance.** [S. l.: s. n.], 2004c. *E-book* (264 p.).

GÓMEZ ARAÚJO, I. D. **Análise modal operacional: métodos de identificação baseados em transmissibilidade.** Orientador: José Elias Laier. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2015. Disponível em: <https://bit.ly/39ukhWo>. Acesso em: 6 nov. 2020.

GÓMEZ ARAÚJO, I. D. **Apontamentos da disciplina de Análise Aerodinâmica.** Foz do Iguaçu: [s. n.], 2019.

GUJEL, D. A.; KAZMIERCZAK, C. S.; MASUERO, J. R. Diagrama tensão-deformação específica em concretos com agregados reciclados de concreto: análise da metodologia proposta pela NBR 8522. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, [s. l.], v. 10, ed. 3, p. 547-567, jun. 2017. Disponível em: <https://bit.ly/36WtCbk>. Acesso em: 9 dez. 2020.

GUTENBRUNNER, G.; SAVOV, K.; WENZEL, H. Sensitivity studies on damping estimation. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIMENTAL VIBRATION ANALYSIS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 2007, Porto, Portugal. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: <https://tinyurl.com/y2c3m6lm>. Acesso em: 6 nov. 2020.

HALVORSEN, W. G.; ANATROL CORPORATION; BROWN, D. L. Impulse technique for structural frequency response testing. **Journal of Sound and Vibration**, [S. l.], p. 8-21, 1 nov. 1977. Disponível em: <https://bit.ly/3bztRsr>. Acesso em: 6 nov. 2020.

HE, X. *et al.* Modal Identification Study of Vincent Thomas Bridge Using Simulated Wind-Induced Ambient Vibration Data. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [S. l.], p. 373-388, 1 maio 2008. Disponível em: <https://bit.ly/3dzLrhx>. Acesso em: 6 nov. 2020.

HE, X. H. *et al.* EMD-based random decrement technique for modal parameter identification of an existing railway bridge. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 33, p. 1348-1356, 2011. Disponível em: <https://bit.ly/2MVvhE5>. Acesso em: 6 nov. 2020.

HUERTA, C. I.; ROESSET, J. M.; STOKOE, K. H. Evaluation of the random decrement method for in-situ soil properties estimation. **The effects of surface geology on seismic motion**, [s. l.], p. 749-756, 1998. Disponível em: <https://bit.ly/2Hv12Ud>. Acesso em: 6 nov. 2020.

HUNT, D. L. *et al.* Development and implementation of a shuttle modal inspection system. *In*: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 8., 1990, Kissimmee, USA. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 1990. Disponível em: <https://go.nasa.gov/39rQLk4>. Acesso em: 6 nov. 2020.

IBRAHIM, S. R.; ASMUSSEN, J. C.; BRINCKER, R. Vector Triggering Random Decrement for High Identification Accuracy. **Journal of Vibration and Acoustics**, [S. l.], p. 970-975, 1 out. 1998. Disponível em: <https://bit.ly/2QOUbXw>. Acesso em: 6 nov. 2020.

IBRAHIM, S. R.; BRINCKER, R.; ASMUSSEN, J. C. Modal parameter identification from responses of general unknown random inputs. *In*: SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 1996, Kawasaki, Japão. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 1996. Disponível em: <https://bit.ly/33Vt3vm>. Acesso em: 6 nov. 2020.

JACOBSEN, N-J; ANDERSEN, P.; BRINCKER, R. Applications of Frequency Domain Curve-fitting in the EFDD Technique. **IMAC-XXVI: A Conference & Exposition on Structural Dynamics**, [s. l.], 2008. Disponível em: <https://tinyurl.com/y6jopnpu>. Acesso em: 6 nov. 2020.

JIANG, X.; ADELI, H. Dynamic fuzzy wavelet neuroemulator for non-linear control of irregular building structures. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [S. l.], p. 1045-1066, 6 dez. 2007b. Disponível em: <https://bit.ly/3dzvkAu>. Acesso em: 6 nov. 2020.

JIANG, X.; ADELI, H. Dynamic Wavelet Neural Network for Nonlinear Identification of Highrise Buildings. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [S. l.], p. 316-330, 17 jun. 2005. Disponível em: <https://bit.ly/3buKG70>. Acesso em: 6 nov. 2020.

JIANG, X.; ADELI, H. Neuro-genetic algorithm for non-linear active control of structures. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [S. l.], p. 770-786, 7 fev. 2008. Disponível em: <https://bit.ly/3dwq9kS>. Acesso em: 6 nov. 2020.

JIANG, X.; ADELI, H. Pseudospectra, MUSIC, and dynamic wavelet neural network for damage detection of highrise buildings. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [S. l.], p. 606-629, 2 jan. 2007a. Disponível em: <https://bit.ly/3ahuUwN>. Acesso em: 6 nov. 2020.

KAREEM, A.; GURLEY, K. Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], p. 131-157, mar. 1996. Disponível em: <https://tinyurl.com/y29jnujl>. Acesso em: 6 nov. 2020.

- KAWIECKI, G. Modal damping measurement for damage detection. **Smart Materials and Structures**, [S. l.], p. 466-471, 1 jan. 2001. Disponível em: <https://bit.ly/2xu4ysM>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- KÖLLING, M.; RESNIK, B.; SARGSYAN, A. Application of the random decrement technique for experimental determination of damping parameters of bearing structures. *In*: International conference on material technologies and modeling, 8., 2014, Ariel, Israel. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2014. Tema: Applied mechanics, structural engineering and seismic design, p. 63-71. Disponível em: <https://bit.ly/2C42E1n>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- KÖNIG, G.; FEHLING, E. Excitation damping of reinforced concrete under cyclic. *In*: IABSE, 13., 1988, Helsinki, Finlândia. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3amcawj>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- LAMARQUE, C. H.; PERNOT, S.; CUER, A. Damping Identification In Multi-Degree-Of-Freedom Systems via a Wavelet-Logarithmic Decrement: Part 1: Theory. **Sound and Vibration**, França, p. 361-374, 8 nov. 1999. DOI 10.1006/jsvi.1999.2928. Disponível em: <https://bit.ly/2MFwzmt>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- LIFSHITZ, J. M.; ROTEM, A. Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], p. 412-423, 1969.
- LIOU, H. Y.; WU, W. F.; SHIN, C. S. A modified model for the estimation of fatigue life derived from random vibration theory. **Probabilistic Engineering Mechanics**, [s. l.], v. 4, p. 281-288, 1999. Disponível em: <https://bit.ly/3i3nVL6>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- LJUNG, Lennart. Parameter estimation methods. *In*: LJUNG, Lennart. **System Identification – Theory for the User**. [S. l.: s. n.], 1999. ISBN 0136566952 9780136566953.
- MAGALAS, L. B.; MALINOWSKI, T. Measurement Techniques of the Logarithmic Decrement. **Solid State Phenomena**, [s. l.], p. 247-260, fev. 2003. Disponível em: <https://bit.ly/2Xj42sH>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- MAYES, R. L. Error Localization Using Mode Shapes- An Application to a Two Link Robot Arm. *In*: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, X., 1992, EUA. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 1992. p. 886-891.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Microestrutura do Concreto. *In*: MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Microestrutura e Propriedades do Concreto Endurecido**. São Paulo, Brasil: IBRACON, 2008.
- MEO, M. *et al.* Measurements of dynamic properties of a medium span suspension bridge by using the wavelet transforms. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [S. l.], p. 1112-1133, 1 jul. 2006. Disponível em: <https://bit.ly/2WKLzVz>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- MINDESS, Sidney. Acoustic Emission Methods. *In*: MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. (ed.). **Handbook on Nondestructive Testing on Concrete**. [S. l.: s. n.], 2004. ISBN 0-8031-2099-0.
- MODENA, C.; SONDA, D.; ZONTA, D. Damage Localization in Reinforced Concrete Structures by Using Damping Measurements. **Key Engineering Materials**, [S. l.], p. 132-141, 1 jun. 1999. Disponível em: <https://bit.ly/2wx6xN8>. Acesso em: 6 nov. 2020.



MORSY, R. *et al.* Use of the random decrement technique for nondestructive detection of damage to beams. **Materials and Structures**, [S. l.], p. 4719–4727, 9 fev. 2016. Disponível em: <https://bit.ly/2UPm6ci>. Acesso em: 6 nov. 2020.

NEILD, S. A.; WILLIAMS, M. S.; MCFADDEN, P. D. Nonlinear Vibration Characteristics of Damaged Concrete Beams. **Journal of Structural Engineering**, [S. l.], p. 260-268, 1 jan. 2003. Disponível em: <https://bit.ly/2QO0LxA>. Acesso em: 6 nov. 2020.

NOCETI FILHO, S. Fundamentos sobre ruídos: Parte 1 - Densidade espectral de potência. **Backstage**, [S. l.], p. 140-144, 1 mar. 2002a. Disponível em: <https://bit.ly/3bzDgQr>. Acesso em: 6 nov. 2020.

NOCETI FILHO, S. Fundamentos sobre ruídos: Parte 2 - Definição, caracterização e tipos de ruídos. **Backstage**, [S. l.], p. 144-147, 1 abr. 2002b. Disponível em: <https://bit.ly/2WOCaME>. Acesso em: 6 nov. 2020.

NOCETI FILHO, S. Fundamentos sobre ruídos: Parte 3 - Ruído Branco e Ruído Rosa. **Backstage**, [S. l.], p. 172-173, 1 maio 2002c. Disponível em: <https://bit.ly/2QOohd2>. Acesso em: 6 nov. 2020.

ORBAN, F. Damping of materials and members in structures. **Journal of Physics: Conference Series**, [S. l.], p. 1-15, 1 jan. 2011. Disponível em: <https://bit.ly/2Ulcoql>. Acesso em: 6 nov. 2020.

PAKRASHI, V.; O'CONNOR, A.; BASU, B. A Study on the Effects of Damage Models and Wavelet Bases for Damage Identification and Calibration in Beams. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [S. l.], p. 555-569, 28 jun. 2008. Disponível em: <https://bit.ly/3anUNel>. Acesso em: 6 nov. 2020.

PAOLINO, D. S. *et al.* Damaged composite laminates: Assessment of residual Young's modulus through the Impulse Excitation Technique. **Composites Part B: Engineering**, [S. l.], p. 76-82, 1 nov. 2017. Disponível em: <https://bit.ly/2wH792D>. Acesso em: 6 nov. 2020.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. *In*: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. [S. l.]: IBRACON, 2011. cap. 16, p. 585-614.

PSIUK, B. *et al.* Impulse Excitation Technique IET as non-destructive method for determining changes during the gelcasting process. **Ceramics International**, [S. l.], p. 3989-3996, 2 dez. 2015. Disponível em: <https://bit.ly/2W0Egfq>. Acesso em: 6 nov. 2020.

RAMIREZ NUÑEZ, Pablo A.; GÓMEZ ARAÚJO, Ivan D. UNILastic: Equipment and software to evaluate mechanical properties of materials by acoustic test. *In*: IBERO-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, XLI., 2020, Foz do Iguaçu. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.cilamce.com.br/arearestrita/apresentacoes/199/8121.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.

RAMSEY, K. A. Effective Measurements for Structural Dynamics Testing: Part 1. **Journal of Sound and Vibration**, [S. l.], p. 1-12, 1 nov. 1975. Disponível em: <https://bit.ly/2Uz7X1i>. Acesso em: 6 nov. 2020.

RAMSEY, K. A. Effective Measurements for Structural Dynamics Testing: Part 2. **Journal of Sound and Vibration**, [S. l.], p. 1-13, 1 abr. 1976. Disponível em: <https://bit.ly/2WMwWRD>. Acesso em: 6 nov. 2020.

RAO, S. S. Determination of Natural Frequencies and Mode Shapes. *In*: RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. [S. l.: s. n.], 1990d. *E-book* (718 p.).

- RAO, S. S. Free Vibration of Single Degree of Freedom Systems. *In*: RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. [S. l.: s. n.], 1990b. *E-book* (718 p.).
- RAO, S. S. Fundamentals of Vibration. *In*: RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. [S. l.: s. n.], 1990a. *E-book* (718 p.).
- RAO, S. S. Multidegree of Freedom Systems. *In*: RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. [S. l.: s. n.], 1990c. *E-book* (718 p.).
- RAO, S. S. Random Vibration. *In*: RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. [S. l.: s. n.], 1990e. *E-book* (718 p.).
- ROEBBEN, G. *et al.* Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. **Review of Scientific Instruments**, [S. l.], p. 4511-4515, 12 dez. 1997. Disponível em: <https://bit.ly/2WZvZ8T>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- ROEBBEN, G. *et al.* The innovative impulse excitation technique for high-temperature mechanical spectroscopy. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], p. 284-287, 28 set. 2000. Disponível em: <https://bit.ly/2WnmVUg>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- RUZZENE, M. *et al.* Natural Frequency and Damping Identification using Wavelet Transform: Application to real data. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [s. l.], p. 207-218, mar. 1997. Disponível em: <https://tinyurl.com/yycjpaab>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- SAJID, S.; CHOUINARD, L. Impulse response test for condition assessment of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], p. 317-328, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3kETM6m>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- SANTOS, A. M. *et al.* Análise do Módulo de Elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2013, Rio Grande do Sul, Brasil. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://bit.ly/39UKKjz>. Acesso em: 9 dez. 2020.
- SILVA, C. W. Vibration Damping. *In*: SILVA, C. W. (ed.). **Vibration Damping, Control, and Design**. [S. l.: s. n.], 2007. *E-book* (634 p.).
- SWAMIDAS, A. S. J.; CHEN, Y. Monitoring crack growth through change of modal parameters. **Journal of Sound and Vibration**, [S. l.], p. 325-343, 21 set. 1995. Disponível em: <https://bit.ly/2UA9STs>. Acesso em: 6 nov. 2020.
- TAKÁCS, G.; ROHAL'-ILKIV, B. Applications of Model Predictive Vibration Control. *In*: TAKÁCS, G.; ROHAL'-ILKIV, B. **Model Predictive Vibration Control: Efficient Constrained MPC Vibration Control for Lightly Damped Mechanical Structures**. [S. l.: s. n.], 2012b. *E-book* (515 p.).
- TAKÁCS, G.; ROHAL'-ILKIV, B. Basics of Vibration Dynamics. *In*: TAKÁCS, G.; ROHAL'-ILKIV, B. **Model Predictive Vibration Control: Efficient Constrained MPC Vibration Control for Lightly Damped Mechanical Structures**. [S. l.: s. n.], 2012a. *E-book* (515 p.).
- TAMURA, Y. *et al.* Ambient vibration testing & modal identification of an office building. *In*: THE INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 2002, Los Angeles, EUA. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 2002. p. 141-146. Disponível em: <https://tinyurl.com/y6yfmujr>. Acesso em: 6 nov. 2020.

TAMURA, Yukio. Damping in Buildings and Estimation Techniques. *In*: TAMURA, Yukio; KAREEM, Ahsan (ed.). **Advanced Structural Wind Engineering**. [S. l.: s. n.], 2012. cap. 13, p. 347-376. Disponível em: <https://tinyurl.com/y4g6btrr>. Acesso em: 6 nov. 2020.

TOGNANA, S. *et al.* Measurements of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], p. 4619-4623, 15 jul. 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3akSxoa>. Acesso em: 6 nov. 2020.

TSE, F. S.; MORSE, I. E.; HINKLE, R. T. Systems with one degree of freedom - theory. *In*: TSE, F. S.; MORSE, I. E.; HINKLE, R. T. **Mechanical Vibrations: Theory and Applications**. [S. l.: s. n.], 1978a. *E-book* (252 p.).

TSE, F. S.; MORSE, I. E.; HINKLE, R. T. Systems with one degree of freedom - applications. *In*: TSE, F. S.; MORSE, I. E.; HINKLE, R. T. **Mechanical Vibrations: Theory and Applications**. [S. l.: s. n.], 1978b. *E-book* (252 p.).

WEST, W. M. Single Point Random Modal Test Technology Application to Failure Detection. **The Shock and Vibration Bulletin**, [s. l.], p. 25-31, maio 1982.

WHITE, G. El analizador TRF. *In*: WHITE, G. **Introducción al Análisis de Vibraciones**. [S. l.: s. n.], 2010c. Disponível em: <https://bit.ly/3bsgz0H>. Acesso em: 6 nov. 2020.

WHITE, G. Examen de Prácticas de Mantenimiento. *In*: WHITE, G. **Introducción al Análisis de Vibraciones**. [S. l.: s. n.], 2010a. Disponível em: <https://bit.ly/3bsgz0H>. Acesso em: 6 nov. 2020.

WHITE, G. Introducción al Fenómeno Vibración. *In*: WHITE, G. **Introducción al Análisis de Vibraciones**. [S. l.: s. n.], 2010b. Disponível em: <https://bit.ly/3bsgz0H>. Acesso em: 6 nov. 2020.

YANG, J. C. S.; CHEN, J.; DAGALAKIS, N. G. Damage Detection in Offshore Structures by the Random Decrement Technique. **Energy Resources Technology**, [S. l.], p. 38-42, 1 mar. 1984. Disponível em: <https://bit.ly/32XFPKK>. Acesso em: 6 nov. 2020.

YANG, J. C. S.; DAGALAKIS, N. G.; EVERSTINE, G. C.; WANG, Y. F. Measurement of Structural Damping using the Random Decrement Technique. **The Shock and Vibration Bulletin**, EUA, p. 63-71, 1983. Disponível em: <https://on.doi.gov/2oqheNe>. Acesso em: 6 nov. 2019.

ZONTA, D.; MODENA, C. Observations on the appearance of dispersive phenomena in damaged structures. **Journal of Sound and Vibration**, [S. l.], p. 925-933, 1 jan. 2001. Disponível em: <https://bit.ly/2QK5eRG>. Acesso em: 6 nov. 2020.

ZONTA, D.; MODENA, C.; BURSI, O. S. Analysis of dispersive phenomena in damaged structures. *In*: EUROPEAN COST F3 CONFERENCE ON SYSTEM IDENTIFICATION AND STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2000, Madrid, Espanha. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2000. p. 801-810.

## APÊNDICE A – Manual para a construção do suporte

**Passo 1** – Cortes dos perfis, tiras e barra maciça de aço inox.

Apresenta-se a seguir o listado de comprimento dos cortes a serem feitos nos perfis, tiras de acabamento e a barra de aço inox.

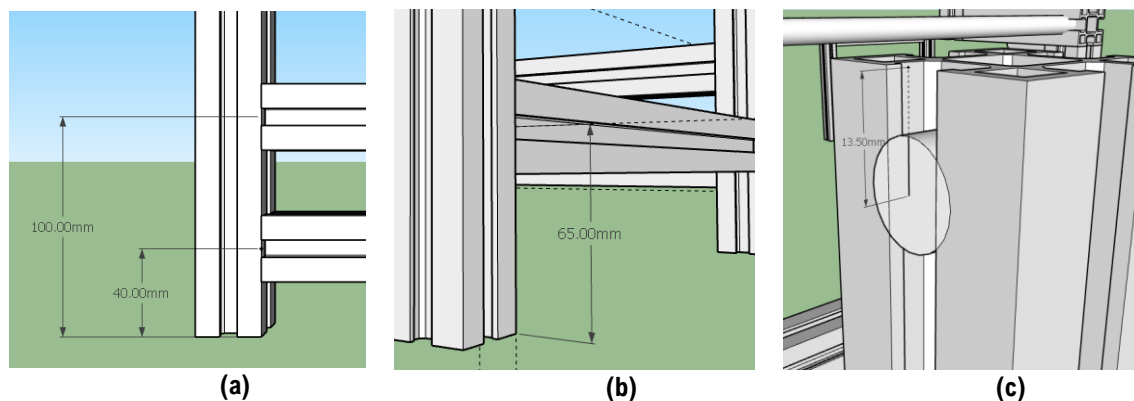
**Tabela 3** – Lista de cortes dos perfis, tiras de acabamento e barra de aço inox

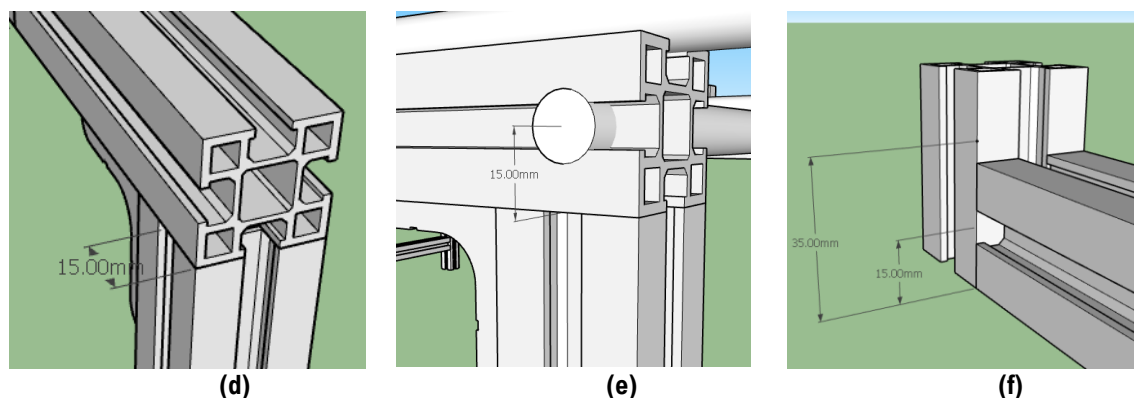
Material	Quantidade	Comprimento (mm)
Acabamento - Tira Lateral para Canal 8	8 pç.	50
	6 pç.	120
	24 pç.	200
	8 pç.	250
	6 pç.	300
	Perfil Estrutural em Alumínio 30x30 Centro M8 - Canal 8	2 pç.
2 pç.		120
6 pç.		200
2 pç.		250
2 pç.		300
Barra redonda maciça de aço inox 1/2 "		2 barras
	3 barras	340
Cabo de aço galvanizado 1/16"	2 cabos	50

Legenda: C – comprimento, pç. – peças.

**Passo 2** – Confeção das roscas e furos em todos os perfis

**Figura 32** – Posição de roscas e furos nos perfis





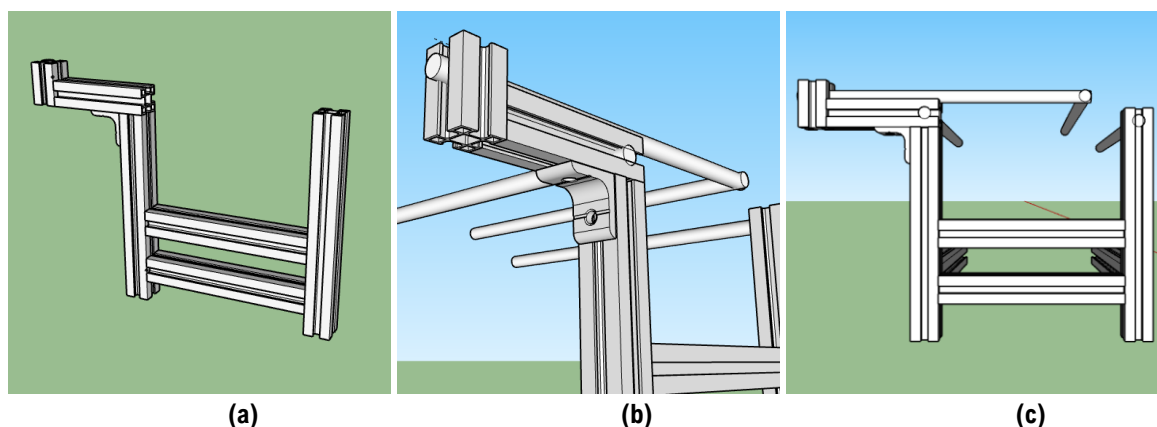
Primeiramente faz-se as roscas nas faces de todos os perfis com ajuda do **Desandador - Vira Macho** e **Macho Máquina - M8**, logo, com ajuda de uma máquina, fura-se o alumínio nos seguintes pontos para a passagem de uma **Chave Allen Longa com Ponta Boleada - 5mm**.

- Para (2) perfis de 250 mm e (2) perfis de 200 mm furar segundo indicado na **Figura 32.a e 32.b**;
- Para os mesmos (2) perfis de 250 mm furar como indicado na **Figura 32.c**;
- Para os (2) perfis de 120 mm, furar como indicado na **Figura 32.d e 32.e**;
- Para os (2) perfis de 50 mm, furar como indicado na **Figura 32.f**;

Salienta-se a importância de limpar logo após as perfurações com o intuito de que os resíduos não obstruam a passagem da **barra redonda maciça de aço inox 1/2 "**.

### Passo 3 – Montagem do esqueleto

**Figura 33** – Esqueleto lateral do suporte



O esqueleto lateral (**Figura 33.a e 33.c**) consta de: (1) peça de 250 mm, (3) de 200 mm, (1) de 120 mm e (1) 80 mm. Para a montagem do esqueleto, primeiramente colocar nas faces das (2) peças de 200 mm, o **Parafuso Allen Cabeça Abaulada M8 x 16mm - Conector 30 Parafuso**, uní-las e apertar com ajuda da **Chave Allen Longa com Ponta Boleada - 5mm** de um lado com (1)

peça de 250 mm e do outro lado com (1) peça de 200 mm, logo na face da peça de 200 mm unir e apertar com (1) peça de 120 mm a qual por sua vez une-se a (1) peça de 80 mm. A fim de dar maior resistência a peça, (1) **Kit Cantoneira 38x38x28mm para Perfil Base 30 - com Porcas e Parafusos** é colocado na intersecção das peças de 250 mm e 120 mm (**Figura 33.b**).

#### **Passo 4** – Colocação dos parafusos para o esticador de aço galvanizado

Em todos os **Esticadores para cabo de aço 3/16**, um dos ganchos é removido e substituído pelo **Parafuso fenda rosca cabeça redonda 3/16 mm**, e encaixa-se nas (2) peças de 300 mm, e no gancho colocam-se os **Grampos para cabo de aço 1/8"** (**Figura 34.a**).

#### **Passo 5** – União dos esqueletos laterais e frontais

Com ajuda das (2) peças de 300 mm com o **Parafuso Allen Cabeça Abaulada M8 x 16mm - Conector 30 Parafuso** em ambas faces, faz-se a conexão dos esqueletos laterais com as demais peças de alumínio e tem-se assim o esqueleto pronto (**Figura 34.b**).

**Figura 34** – Montagem do esqueleto



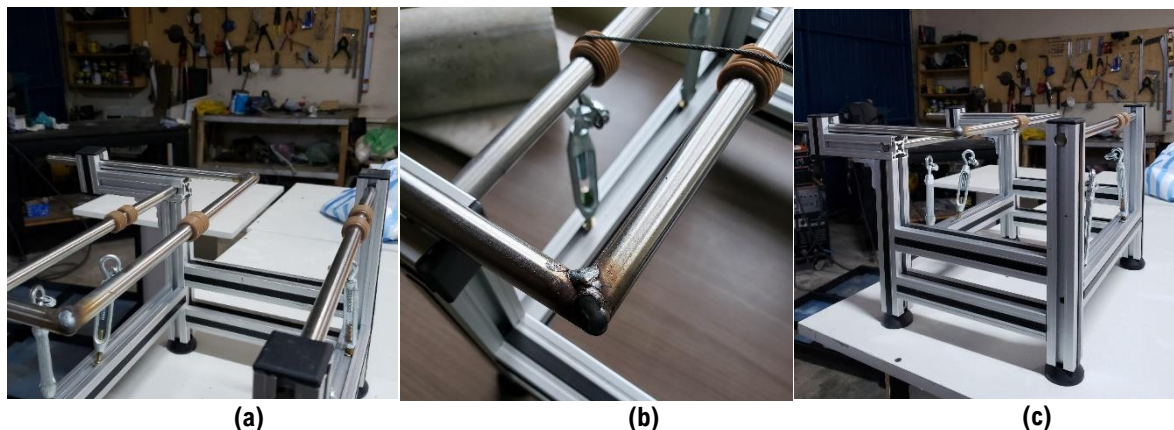
(a)



(b)

#### **Passo 6** – Colocação das barras de aço inox

Faz-se o corte de todos os **Adaptadores PVC solda rosca curto de 25 mm x 3/4"**, deixando para o uso somente a rosca (**Figura 35.a**), a qual coloca-se (2) roscas nas (3) barras de 340 mm. A seguir em (1) barra de 340 mm e (2) barras de 320 mm numa das pontas respectivamente faz-se o corte com serra a 45° (**Figura 35.b**) e faz-se a soldagem das mesmas. Antes de fazer a soldagem, colocar as roscas de PVC. Finalmente deixa-se esfriar a barra como apresentado na **Figura 35.c**.

**Figura 35** – Montagem das barras de aço inox no esqueleto.**Passo 7** – Montagem dos esticadores

O cabo é amarrado gancho a gancho, depois preso e apertado com ajuda dos grampos.

**Passo 8** – Finalização com os acabamentos**Figura 36** – Finalização do suporte com os acabamentos

Para finalizar, faz-se a montagem dos pés, colocação das capas de fechamento e tiras de acabamento.

## APÊNDICE B – Lista de materiais e custo para a fabricação do suporte UNILAstic.

<b>Materiais</b>	<b>Un.</b>	<b>Quant.</b>	<b>Valor Unitário (R\$)</b>	<b>Valor Total (R\$)</b>
Capa de Fechamento Frontal - Quadrada - 4 un	pc	2	6.3	12.6
Acabamento - Tira Lateral para Canal 8	ml	10	2.62	26.2
Perfil Estrutural em Alumínio 30x30 Centro M8 - Canal 8	ml	3	39.2	117.6
Pé Nivelador Base 40 - c/ Porca Sextavada - 2 un	pc	2	6.7	13.4
Kit Cantoneira 38x38x28mm para Perfil Base 30 - com Porcas e Parafusos	pc	2	8.85	17.7
Desandador - Vira Macho	un	1	87.5	87.5
Chave Allen Longa com Ponta Boleada - 5mm	un	1	12.96	12.96
Macho Máquina - M8	un	1	81	81
Parafuso Allen Cabeça Abaulada M8 x 16mm - Conector 30 Parafuso - 10 un	pc	2	9.35	18.7
Esticador para cabo de aço 3/16	un	4	3	12
Adaptador PVC solda rosca curto de 25 mm x 3/4"	un	6	0.55	3.3
Parafuso fenda rosca cabeça redonda 3/16 mm	un	4	0.5	2
Barra redonda maciça de aço inox 1/2 "	ml	1.66	78	129.48
Grampo para cabo de aço 1/8"	un	4	0.55	2.2
Cabo de aço galvanizado 1/16"	un	2	0.6	1.2
Mangueira Flexível para Água Branco Baixa Pressão 1/2" 30cm	un	1	0	0
Esfera de aço	un	1	0	0
Pedestal Mini Suporte Microfone Ask Bumbo Mesa + Cachimbo	un	1	103.55	103.55
Serviço de corte e soldadura das barras redondas maciças de aço inox	gl	1	30	30
Serviço de solda - Dispositivo de Impulso Manual Leve	gl	1	10	10
Serviço perfuração dos perfis estrutural em alumínio	gl	1	50	50
<b>Total global (R\$)</b>				<b>731.39</b>

Legenda: un. – unidade; gl. – global; ml. – metro linear; pc. – pacote; Quant. – quantidade; Un. - unidade



**ANEXO A – Resultados dos ensaios de resistência à compressão com os corpos de prova moldados e testemunhos extraídos de 10 cm x 20 cm – Central dosadora CONCRET MAX S.A., Pdte. Franco/PY.**

MOLDE N° ORTE	CORPO DE PROVA				ENSAIO (DIAS)			TENSAO DE RUPTURA EM Kg./cm <sup>2</sup> .				
	Data de Moldage	Slump cm	Diâmetro cm	Seção cm <sup>2</sup>	Data de Ruptura	3	7	28	CARGA Kg.	PRESSA O	FKC (Projetad Resisten	% da
19800	MIXER 04 08-10-19	16±2	10	78.5	15-10-19		22215		22215	283	300	94%
19801	MIXER 04 08-10-19	16±2	10	78.5	15-10-19		21587		21587	275	300	92%
19804	MIXER 01 08-10-19	16±2	10	78.5	15-10-19		20096		20096	256	300	85%
19805	MIXER 02 08-10-19	16±2	10	78.5	15-10-19		23157		23157	295	300	98%
19810	MIXER 09 08-10-19	16±2	10	78.5	15-10-19		16877		16877	215	300	72%