

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Sammuel Weber Favretto

**A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, RESISTÊNCIA, MÉTODO DE  
RESFRIAMENTO E REIDRATAÇÃO NA FREQUÊNCIA DE  
VIBRAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA ESTRUTURAL**

Santa Maria, RS  
2021

**Sammuel Weber Favretto**

**A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, RESISTÊNCIA, MÉTODO DE  
RESFRIAMENTO E REIDRATAÇÃO NA FREQUÊNCIA DE  
VIBRAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. D.Sc Marco Antônio Silva Pinheiro

Santa Maria, RS  
2021

**Sammuel Weber Favretto**

**A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, RESISTÊNCIA, MÉTODO DE  
RESFRIAMENTO E REIDRATAÇÃO NA FREQUÊNCIA DE  
VIBRAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

**Aprovado em 16 de dezembro de 2021:**

---

**Marco Antônio Silva Pinheiro, D.Sc. (UFSM)**

---

**João Kaminski Junior, Dr. (UFSM)**

---

**Gihad Mohamad, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2021

## RESUMO

# A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, RESISTÊNCIA, MÉTODO DE RESFRIAMENTO E REIDRATAÇÃO NA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA ESTRUTURAL

AUTOR: Sammuel Weber Favretto

ORIENTADOR: Prof. D.Sc. Marco Antônio Silva Pinheiro

A frequência natural de vibração de peças é diretamente ligada aos módulos de elasticidade dinâmico e estático, que são fatores fundamentais na análise e dimensionamento de estruturas, e ao coeficiente de Poisson, que influencia diretamente os efeitos de cisalhamento. É neste contexto que o presente trabalho possui o objetivo de investigar a influência da temperatura de aquecimento, resistência nominal de referência das argamassas, método de resfriamento e reidratação sobre a frequência natural transversal de vibração de corpos retangulares de argamassa estrutural. Foram ensaiados, no Laboratório de Acústica da Universidade Federal de Santa Maria, 240 corpos de prova com argamassas de 3 resistências diferentes, submetidos a 10 faixas de temperaturas diferentes, 2 métodos de resfriamento em duas datas, a primeira no dia após o aquecimento e a segunda após 28 dias da primeira, seguindo as diretrizes presentes na ASTM C215 – 19, que trata da avaliação de frequências ressonantes em corpos de prova de concreto. Através da elaboração de gráficos, verificou-se que a resistência nominal tem uma relação direta com a frequência natural transversal de vibração, a temperatura de aquecimento tem uma relação inversa, enquanto os métodos de resfriamento apresentaram o mesmo resultado para as amostras sem reidratação, mas para amostras reidratadas o método de resfriamento brusco apresentou frequências mais elevadas que as amostras submetidas ao resfriamento lento. Por fim, a reidratação das amostras apresentou um aumento da frequência natural transversal de vibração das amostras.

**Palavras Chave:** Frequência; Vibração; Temperatura; Resistência; Reidratação; Impacto; Influência; Aquecimento; Resfriamento.

## ABSTRACT

# THE INFLUENCE OF TEMPERATURE, RESISTANCE, COOLING METHOD AND REHYDRATION ON THE FUNDAMENTAL RESSONANCE FREQUENCY OF STRUCTURAL MORTAR SAMPLES

AUTHOR: Sammuel Weber Favretto  
ADVISOR: Prof. D.Sc Marco Antônio Silva Pinheiro

The fundamental resonance frequency of parts is directly linked to the dynamic and static elasticity modulus, which are fundamental factors in the analysis and design of structures, and to the Poisson's coefficient, which directly influences the shear effects. It's in this context that the present work aims to investigate the influence of heating temperature, nominal reference resistance of mortars, cooling and rehydration method on the fundamental resonance frequency of rectangular bodies of structural mortar. In the Acoustics Laboratory of the Federal University of Santa Maria, 240 specimens were tested with mortars of 3 different resistances, submitted to 10 different temperature ranges, 2 cooling methods on two dates, the first on the day after the heating and the second, 28 days after the first, following the guidelines present in ASTM C215 - 19, that has as objective the evaluation of resonant frequencies in concrete specimens. Through the elaboration of graphs, it was found that the nominal resistance has a direct relationship with the transverse natural frequency of vibration, the heating temperature has an inverse relationship, while the cooling methods showed the same result for the samples without rehydration, but for rehydrated samples, the sudden cooling method showed higher frequencies than samples submitted to slow cooling. Finally, the rehydration of the samples showed an increase in the natural transverse frequency of vibration of the samples.

**Keywords:** Frequency; Ressonance; Temperature; Resistance; Rehydration; Impact: Influence; Heating; Cooling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pêndulo simples - Sistema com 1 GDL .....	17
Figura 2. Viga em balanço - Sistema com infinitos GDL .....	17
Figura 3. Modelagem física de um sistema motocicleta + motociclista.....	18
Figura 4. Modos de vibração de uma viga biapoiada.....	19
Figura 5. Teste modal usando o excitador de vibrações.....	21
Figura 6. Comparação entre as formas modais obtidas para um experimento com 30 graus de liberdade e outro com 4 graus de liberdade. ....	23
Figura 7. (a) Acelerômetro de carga e seu condicionador e (b) acelerômetro ICP com sua fonte externa.....	24
Figura 8. Teste modal usando excitação por impacto .....	25
Figura 9. Modelos de entrada e saída em sistemas lineares: (a) No domínio do tempo e (b) no domínio na frequência.....	26
Figura 10. Métodos de identificação de parâmetros no domínio da frequência.....	27
Figura 11. Métodos de único grau de liberdade .....	27
Figura 12. Influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade do concreto. ....	29
Figura 13. Curva de probabilidade de spalling para um grupo particular de concretos .....	30
Figura 14. Redução da resistência à compressão do concreto sem aplicação de carga e ensaiado quente. ....	32
Figura 15. (A) aquecido sem carregamento e ensaiado quente; (B) aquecido com carga igual a 0,4 da resistência e ensaiado quente; (C) aquecido sem carregamento e ensaiado depois de 7 dias conservados a 21 °C. ....	33
Figura 16. Esquema de equipamentos para o teste de vibração forçada. ....	35
Figura 17. Esquema de equipamentos para o teste de vibração por impacto. ....	35
Figura 18. Localização dos transdutores para captação dos sinais de entrada e saída. ....	36
Figura 19. Representação do esforço de cisalhamento.....	38
Figura 20. Imersão das amostras em água à temperatura ambiente após seu aquecimento (Resfriamento Brusco) .....	41
Figura 21. Vista superior com representação geométrica dos pontos de apoio, posicionamento do acelerômetro, local de impacto e dimensões da amostra. ....	42
Figura 22. Representação esquemática do sistema necessário para execução do ensaio .....	43
Figura 23. Sistema montado para execução do ensaio .....	43

Figura 24. Valor residual da frequência natural transversal de vibração x temperatura de aquecimento .....	46
Figura 25. Amostras de 4 MPa e 20 MPa submetidas a 900°C e arrefecidos à temperatura ambiente .....	47
Figura 26. Amostras de 12 MPa submetidas à 900°C e arrefecidas à temperatura ambiente...	47
Figura 27. Amostras de 12 MPa submetidas a 900°C após a submersão em água.....	48
Figura 28. Amostras de 4MPa submetidas à 900°C após a submersão em água.....	48
Figura 29. Comparativo das frequências de vibração entre as amostras RL/RB para amostras de 4 MPa .....	52
Figura 30. Comparativo das frequências de vibração entre as amostras RL/RB para amostras de 12 MPa .....	52
Figura 31. Comparativo das frequências de vibração entre as amostras RL/RB para amostras de 20 MPa .....	53
Figura 32. Comparativo médio das frequências de vibração entre as amostras RL/RB para amostras das três resistencias .....	53
Figura 33. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal.....	56
Figura 34. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento lento sem reidratação .....	56
Figura 35. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento brusco sem reidratação.....	57
Figura 36. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento lento com reidratação .....	57
Figura 37. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento brusco com reidratação .....	58
Figura 38. Variação da frequência natural transversal de vibração após o período de reidratação .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resistência à compressão residual para concretos submetidos a diferentes tempos de exposição e diferentes taxas de aquecimento e resfriamento.....	28
Tabela 2. Coeficiente de dilatação térmica dos agregados.....	30
Tabela 3. Influência do teor de agregado sobre o coeficiente de dilatação térmica da pasta ...	31
Tabela 4. Coeficiente de dilatação térmica linear de concreto 1:6 com diversos tipos de agregados.....	31
Tabela 5. Redução da resistência à compressão de acordo com o tipo de tratamento aos espécimes após aquecimento.....	34
Tabela 6. redução da resistência à compressão e do módulo de deformação de acordo com o tipo de resfriamento dos espécimes após aquecimento.....	34
Tabela 7. Resultados dos ensaios de frequência natural transversal de vibração.....	45
Tabela 8. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação 4 MPa.....	49
Tabela 9. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação 12 MPa.....	50
Tabela 10. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação 20 MPa.....	50
Tabela 11. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação.....	51
Tabela 12. Relação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 12 MPa / 4 MPa.....	54
Tabela 13. Comparação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 20 MPa / 12 MPa.....	55
Tabela 14. Comparação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 20 MPa / 4 MPa.....	55
Tabela 15. Variação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 4 MPa após o período de reidratação.....	59
Tabela 16. Variação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 12 MPa após o período de reidratação.....	59
Tabela 17. Variação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 20 MPa após o período de reidratação.....	60



Tabela 18. Variação da frequência natural transversal de vibração de todas as amostras após o período de reidratação ..... 60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	<b>Objetivo Geral</b>	<b>15</b>
1.2.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b>	<b>16</b>
2.1	VIBRAÇÕES	16
2.2	PARÂMETROS MODAIS, CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS	18
2.2.1	<b>Frequência natural de vibração</b>	<b>19</b>
2.2.2	<b>Modos de vibração</b>	<b>19</b>
2.2.3	<b>Fator de amortecimento</b>	<b>20</b>
2.3	ANÁLISE MODAL	20
2.4	ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	21
2.4.1	<b>Condições de Contorno</b>	<b>22</b>
2.4.2	<b>Modelo Geométrico</b>	<b>22</b>
2.4.3	<b>Sinais de Excitação e Formas de Excitação</b>	<b>23</b>
2.4.4	<b>Medição da Excitação e Resposta</b>	<b>24</b>
2.4.5	<b>Testes com Martelo de Impacto</b>	<b>24</b>
2.4.6	<b>Estimação das FRFs</b>	<b>25</b>
2.4.7	<b>Identificação dos Parâmetros Modais</b>	<b>26</b>
2.4.8	<b>Análise modal em estruturas simples</b>	<b>27</b>
2.5	MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	28
2.5.1	<b>Mudanças Físicas</b>	<b>29</b>
2.5.2	<b>Mudanças químicas</b>	<b>32</b>
2.5.3	<b>Análise de fatores externos</b>	<b>33</b>
2.6	NORMAS	34
2.6.1	<b>Módulo dinâmico de elasticidade (<math>E</math>)</b>	<b>37</b>
2.6.2	<b>Módulo dinâmico de cisalhamento (<math>G</math>)</b>	<b>37</b>
2.6.3	<b>Coefficiente dinâmico de Poisson (<math>\mu</math>)</b>	<b>38</b>
2.6.4	<b>Utilização das frequências naturais de ressonância como alternativa</b>	<b>39</b>
2.6.5	<b>Ensaio não-destrutivo</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
3.1	PROPOSTA	40
3.1.1	<b>Hidratação</b>	<b>40</b>
3.1.2	<b>Resistência</b>	<b>41</b>
3.1.3	<b>Método de resfriamento</b>	<b>41</b>
3.2	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	42
3.2.1	<b>Descrição dos corpos de prova e modelo geométrico</b>	<b>42</b>
3.2.2	<b>Equipamentos utilizados</b>	<b>42</b>
3.2.3	<b>Montagem do sistema e realização das medições</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÕES E RESULTADOS</b>	<b>45</b>
4.1	RESULTADOS GERAIS	45
4.2	TEMPERATURA DE AQUECIMENTO	45
4.3	MÉTODO DE RESFRIAMENTO	49

4.4	RESISTÊNCIA .....	54
4.5	REIDRATAÇÃO .....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O interesse pelo estudo das vibrações iniciou quando o ser humano desvendou os primeiros instrumentos musicais, porém só começou a ter bases científicas com Pitágoras (582-507 a.c.) que fez experimentos com uma corda vibratória e um instrumento denominado monocórdio. Na China antiga foram desenvolvidos os primeiros sismógrafos para a medição de terremotos utilizando pêndulos e Galileu Galilei (1564-1642) foi a primeira pessoa a associar pêndulos ao conceito de período e, conseqüentemente, à frequência e seu fenômeno mais conhecido, a ressonância. Segundo Rao (2008) a humanidade começou a se interessar pela vibração a partir da utilização dos primeiros instrumentos musicais e a partir desse momento tem-se investigado cada vez mais os conceitos e fenômenos como período, vibração, frequência e ressonância. Há relatos de instrumentos musicais nas civilizações chinesa, hindu, japonesa e egípcia desde 4000 a.C. Um dos principais instrumentos responsáveis por despertar a curiosidade humana sobre a vibração foram os instrumentos de cordas com destaque provavelmente às harpas que em 2600 a.C. já eram acompanhadas de caixas de ressonância como pode ser observado no Museu Britânico atualmente.

Pitágoras (582-507 a.C.) foi o primeiro pesquisador a investigar sons musicais com base científica, porém o aprofundamento só veio com Galileu Galilei no século XVII d.C. através do estudo de pêndulos, o mesmo instrumento utilizado por chineses no século II para a criação do primeiro sismógrafo conhecido. Galileu descreveu a correlação entre a frequência e vibração e o comprimento de um pêndulo simples juntamente com o fenômeno da ressonância a qual ele chamou de vibrações solidárias. Marin Mersenne (1588-1648), considerado o pai da acústica, foi o primeiro a medir a frequência de vibração de uma corda (RAO, 2008).

Desde então o estudo das vibrações e frequências de corpos fluidos e sólidos foram utilizados na abordagem de problemas como o desbalanceamento de discos rotativos, vibração de vigas e vibração torsional de hélices de navios, porém apenas recentemente, no século XX, artigos publicados abriram caminho para a aplicação de vibrações aleatórias a problemas práticos de engenharia.

Os primeiros estudos sobre vibração foram direcionados ao entendimento de fenômenos naturais e de teorias matemáticas que descrevessem a vibração de sistemas físicos, contudo cada vez mais as investigações são direcionadas a problemas da área das engenharias como projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistemas de controle. Todos estes itens podem apresentar problemas que tem como peça chave a frequência de vibração.

Motores desbalanceados podem causar ondas terrestres suficientes para causar incômodos em áreas urbanas, vibrações em turbinas causam falhas mecânicas espetaculares e o fenômeno da ressonância pode levar uma estrutura a sua ruína como é observado em acidentes com pontes (RAO, 2008). Todos estes problemas têm origem na elaboração de projeto e nem foram citados os problemas relacionados a fadiga que uma vibração constante causa nas peças e materiais envolvidos.

A vibração pode ser uma aliada ou uma inimiga. Em estruturas, o projetista sempre tem como meta elaborar um sistema de suporte que não seja danoso. Em máquinas e motores, o objetivo principal é minimizar o desbalanceamento, porém a utilização de vibrações se torna favorável em peneiras, compactadores, bate-estacas, testes vibratórios de materiais e simulação de terremotos.

Assim sendo, este trabalho se propôs a medir experimentalmente e analisar a influência da resistência nominal da argamassa, da temperatura de aquecimento, tipo de resfriamento e reidratação da argamassa na frequência natural transversal de vibração das amostras retangulares de argamassa estrutural. Este trabalho também simula as condições a que a argamassa de assentamento estrutural estaria sujeita em caso de incêndio através do aquecimento e posterior resfriamento, lento ou brusco, do corpo de prova.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O conhecimento das propriedades dinâmicas dos materiais é de suma importância para a correta elaboração de sistemas de engenharia. Quando uma estrutura é submetida a uma força oscilatória de qualquer natureza, a amplitude de vibração será maior quando o sinal da força possuir frequência próxima a natural do sistema, ou seja, na região de ressonância (SOEIRO, 2001). Portanto o conhecimento da frequência natural de vibração dos materiais se torna obrigatório. Outra aplicação prática é a utilização dos conceitos de vibrações na área de controle de ruídos. Considerando dois ambientes separados por um sistema construtivo, seja parede ou esquadrias, a quantidade de energia que passa de um ambiente para o outro será maior quando o sinal da excitação possuir frequências próximas aos modos vibracionais do sistema estrutural separador, tanto na frequência de ressonância, onde o conjunto estrutura/ar se comporta como um sistema massa mola, quanto nos modos de flexão onde ocorre o fenômeno de coincidência (LONG, 2005).

Através deste trabalho, portanto, será possível ter um maior conhecimento sobre o comportamento da argamassa de assentamento estrutural, inclusive em situações de incêndio, e assim elaborar melhores e mais eficazes projetos de engenharia.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral medir a frequência natural transversal de vibração de corpos de prova de argamassa de assentamento de alvenaria estrutural.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Análise da influência da resistência nominal da argamassa na frequência natural transversal de vibração de corpos de prova de argamassa de assentamento estrutural;
- Avaliação da influência da temperatura de aquecimento na frequência natural transversal de vibração de corpos de prova de argamassa de assentamento estrutural;
- Avaliação da influência do método de resfriamento na frequência natural transversal de vibração de corpos de prova de argamassa de assentamento estrutural;
- Avaliação da influência da reidratação do corpo de prova na frequência natural transversal de vibração de corpos de prova de argamassa de assentamento estrutural.

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A revisão bibliográfica terá uma abordagem teórica sobre vibrações, parâmetros modais, análise modal, materiais em situação de incêndio e normas que possibilitem uma melhor compreensão do projeto, mas sem um aprofundamento da teoria matemática envolvida na determinação dos parâmetros modais.

### 2.1 VIBRAÇÕES

Segundo Silva (2009), vibração é definida como um movimento periódico de uma partícula, sistema de partículas ou um corpo rígido ao redor de uma posição de equilíbrio. Já Rao (2008), define vibração ou oscilação como qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo e cita o exemplo de um pêndulo e o de uma corda dedilhada.

Rao (2008), mostra que um sistema vibratório depende de três meios, um para armazenar energia potencial, usualmente chamado de mola ou elasticidade, um meio para armazenar energia cinética, usualmente denominado massa ou inércia e um meio de perda de energia, o amortecedor. A vibração assim é caracterizada pela transferência de energia entre os meios. Caso o sistema seja amortecido, certa quantidade de energia é dissipada a cada ciclo e assim depende de uma fonte externa para manter um regime permanente de vibração.

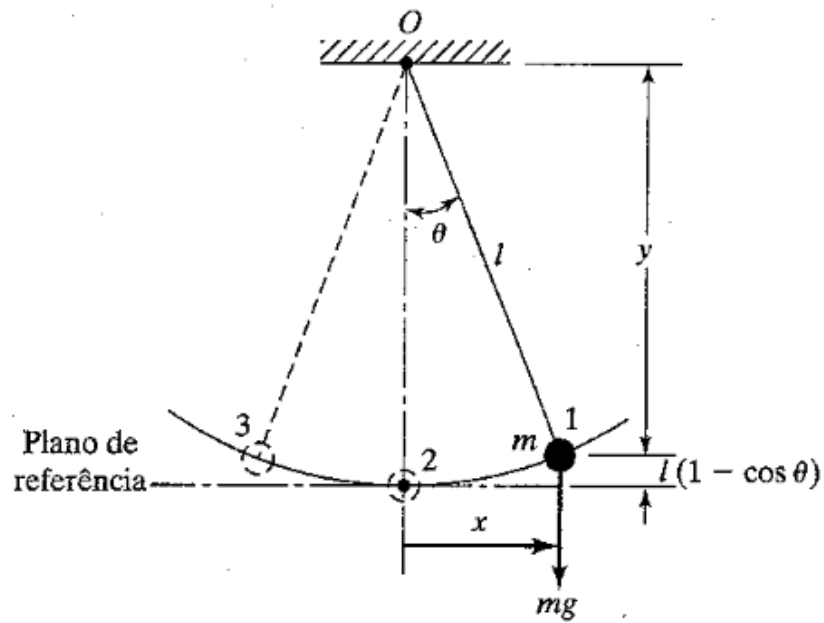
As vibrações podem ser livres ou forçadas, dependendo da existência de uma força de excitação; amortecidas ou não amortecidas, dependendo da existência de amortecimento; lineares ou não-lineares, dependendo da proporcionalidade entre a excitação e resposta e determinísticas ou aleatórias, dependendo assim da sua previsibilidade de ocorrência. (SURE SOEIRO, 2008).

Rao (2008) define graus de liberdade como “O número mínimo de coordenadas independentes requeridas para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema a qualquer instante”.

Um pêndulo simples, como mostrado na Figura 1, é um exemplo de sistemas com apenas um grau de liberdade e é denominado discreto, já sistemas com infinitos graus de liberdade, como uma viga em balanço observada na Figura 2, são denominados contínuos. Rao (2008) comenta que a maioria dos sistemas estruturais e máquinas possuem elementos deformáveis (elásticos) e, portanto, apresentam um número infinito de graus de liberdade.

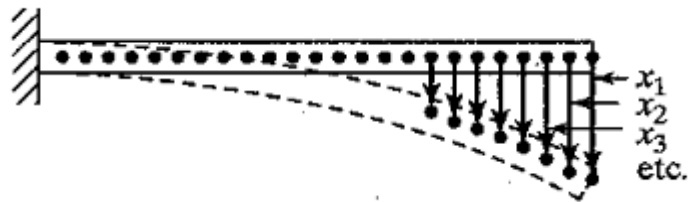


Figura 1. Pêndulo simples - Sistema com 1 GDL.



Fonte: Rao (2008).

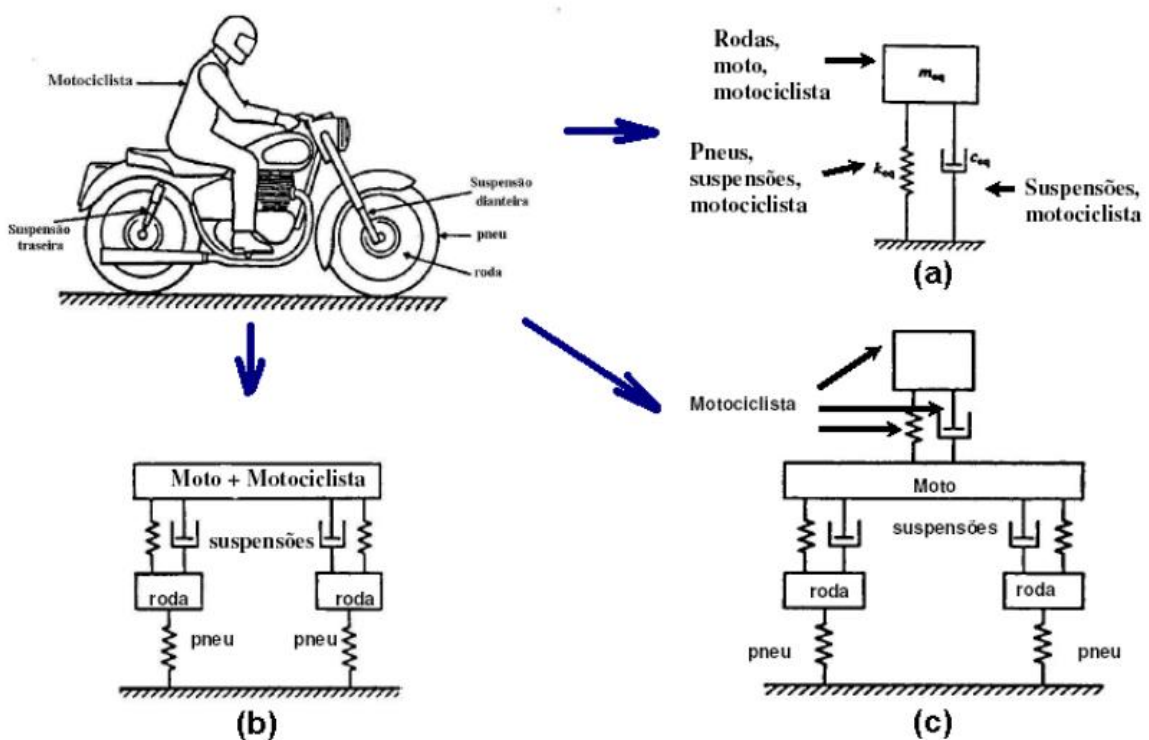
Figura 2. Viga em balanço - Sistema com infinitos GDL



Fonte: Rao (2008).

A vibração usualmente é indesejável pois provoca, além de movimentos desagradáveis, ruídos, tensões dinâmicas, que causam fadiga e levam a falhas na estrutura, perda de energia e desempenho (ALMEIDA, 1990). Portanto é necessária uma análise minuciosa do comportamento dinâmico da estrutura durante a fase de projeto onde mudanças podem ser facilmente feitas, evitando futuros problemas. A modelagem de sistemas vibratórios pode ser simples, mas deve contar com todos os aspectos principais do problema em questão (SURE SOEIRO, 2008). Quanto mais detalhado um modelo, mais próximo da realidade serão os resultados, porém maior será também a complexidade matemática na hora de descrever o sistema. A Figura 3 exemplifica essa questão;

Figura 3. Modelagem física de um sistema motocicleta + motociclista



Fonte: SOEIRO (2008).

## 2.2 PARÂMETROS MODAIS, CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS

Os parâmetros modais ou características dinâmicas são características intrínsecas dos sistemas e estão descritos a seguir.

### 2.2.1 Freqüência natural de vibração

A freqüência natural de vibração ( $\omega_n$ ) é função direta da rigidez ( $\kappa$ ) e inversa da massa do sistema ( $m$ ) e tem como a unidade mais comum utilizada para a representação o Hertz (Hz). A equação (1) demonstra o cálculo para a obtenção da freqüência natural de um sistema com um grau de liberdade.

$$\omega_n = \sqrt{\kappa/m} \text{ (rad/s)} \quad (1)$$

HE e FU (2001) definem que as freqüências naturais indicam a taxa de oscilação livre do elemento. Uma estrutura possui diversas freqüências naturais dentro de uma faixa de freqüências, porém tem como principal a primeira, pois é a que envolve mais energia em sua ação.

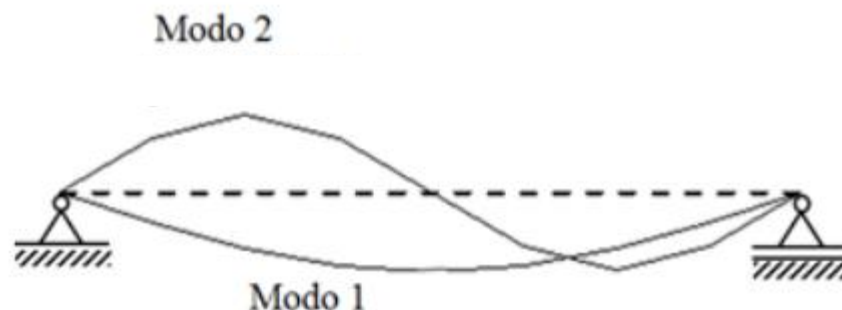
Para estruturas complexas, com vários graus de liberdade, a identificação das freqüências naturais depende de análises teóricas e experimentais como será explicado na próxima seção deste capítulo.

### 2.2.2 Modos de vibração

Salgado (2012), comenta que os modos de vibração naturais são descritos pelas características dinâmicas do sistema, ou seja, são inerentes ao mesmo.

Um elemento possui um perfil de vibração para cada freqüência natural e esses modos de vibração determinam os deslocamentos que cada ponto da estrutura irá sofrer quando estiver submetida a certa freqüência como pode ser observada na Figura 4.

Figura 4. Modos de vibração de uma viga biapoada



Cada frequência natural determinará um padrão de deslocamentos na estrutura. Estes padrões, que são inerentes aos elementos do sistema, podem causar sérios danos estruturais e levar a inutilização do sistema quando menosprezados na fase de projeto.

### **2.2.3 Fator de amortecimento**

Existem diversos tipos de amortecimento, muitas vezes também chamado de atrito interno. Ele representa as formas como um sistema dissipa sua energia e usualmente determina a amplitude de vibração e o tempo após cessada a excitação pelo qual o elemento continuará vibrando (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

## **2.3 ANÁLISE MODAL**

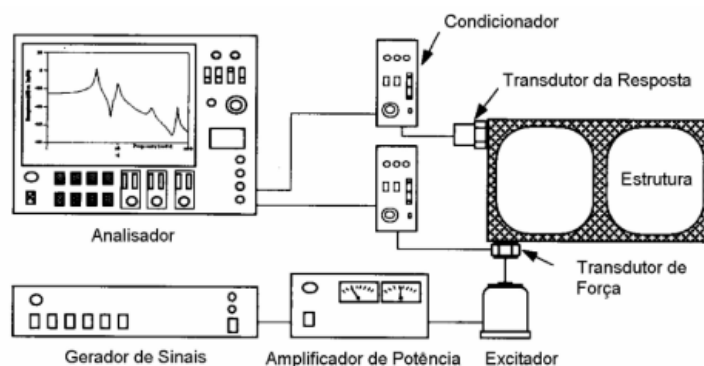
A análise modal almeja a elaboração de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico de um sistema através da identificação dos seus parâmetros modais, ou seja, suas frequências naturais, módulos de vibração e razões de amortecimento (BOLINA et al., 2014).

Para a utilização da análise modal, o sistema em estudo deve respeitar 3 hipóteses: a linearidade do comportamento dinâmico, os parâmetros físicos da estrutura serem constantes e a relação entrada/saída medida deve conter informações suficientes para determinar o comportamento dinâmico do modelo (BORGES, 2006).

Schwarz e Richardson (1999) destacam que as características dinâmicas podem ser obtidas de duas formas: analiticamente, combinada com procedimentos numéricas, ou experimentalmente, através de ensaios em laboratórios ou em campo. Atualmente, devido aos avanços computacionais, a modelagem por elementos finitos abriu uma nova gama de possibilidades permitindo a modelagem de estruturas cada vez mais complexas.

É possível também determinar as características dinâmicas de um sistema experimentalmente. A análise modal experimental (AME) consiste na excitação da estrutura em um ou vários pontos pré-determinados e medição simultânea dos sinais de entrada (excitação) e saída (resposta) (CRUZ, 2006). Através do processamento destes dados por um computador ou analisador de sinais são obtidos um conjunto de funções resposta em frequência (FRFs) e a partir dessas funções são extraídos os parâmetros modais (OLIVEIRA, 2015). A Figura 5 demonstra as etapas descritas acima. A AME muitas vezes é utilizada para a validação de resultados obtidos através das análises teóricas e vice-versa.

Figura 5. Teste modal usando o excitador de vibrações



Fonte: Maia e Silva (1997)

A análise modal experimental tradicional utiliza os dados de entrada e saída para identificar os parâmetros modais, porém, em muitas ocasiões, como estruturas e máquinas em operação é impossível medir precisamente os diversos sinais de excitação. Nestes casos, faz-se uso da análise modal operacional (AMO), também conhecida como análise modal ambiente, que trabalha diretamente com as respostas dinâmicas (sinais de saída), estes sim passíveis de medições. Em geral, nestes casos, as fontes de excitação são conhecidas apenas estatisticamente (DESFORGES *et al.*, 1995). A AMO é citada na literatura como uma excelente alternativa nas áreas da engenharia civil e mecânica para o teste de grandes estruturas e sistemas de engenharias complexos (NUNES, 2015).

## 2.4 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

Dovel (1989) exemplifica as aplicações dos resultados de um teste modal de acordo com sua finalidade. Abaixo estão cinco objetivos finais por ele citados:

1. Predição da Resposta Forçada: prever a resposta de um sistema, de modelo modal conhecido, sujeito a forças de excitação também conhecidas;
2. Identificação de Forças de Excitação: ao contrário do primeiro item, seria identificar as forças de excitação através da resposta do sistema;
3. Modificação Estrutural: possuindo o modelo modal de uma estrutura é possível antever os efeitos de modificações na massa, rigidez ou amortecimento. Qualquer alteração nesses itens gerará um novo modelo modal;

4. Subestruturamento: conhecendo as características dinâmicas dos elementos que constituem uma estrutura complexa é possível determinar os parâmetros modais da estrutura;
5. Correlação com Modelos Numéricos: muitas vezes torna-se necessária a comparação dos testes experimentais com uma modelagem feita em elementos finitos. Isso tem como objetivo a validação dos resultados.

A preparação de um teste modal exige um planejamento quanto a forma de suporte da estrutura de teste, quantos pontos da estrutura serão ensaiados, como será a medição da excitação e resposta da estrutura e definições sobre os tipos de sinais e mecanismos de excitação utilizados.

#### **2.4.1 Condições de Contorno**

As condições de contorno, ou seja, a forma como a estrutura teste será suportada pode seguir duas condições. Quando a estrutura teste não for suportada por nenhum vínculo tem-se uma condição totalmente livre. A alternativa é a fixação da estrutura teste em um suporte totalmente rígido. Cruz (2006) ressalta que na prática nenhuma das condições é alcançada, sempre existirá uma interferência da estrutura de suporte na condição livre e alguma flexibilidade na base rígida. Uma forma de evitar este problema seria a medição prévia da função de resposta em frequência (FRF) da estrutura de suporte. Se a resposta for significativamente menor que a estrutura teste pode-se considerar a estrutura de suporte como sendo rígida (EWINS, 1984).

Ewins (2000) destaca a condição livre sendo a mais utilizada nos ensaios experimentais, onde a suspensão da estrutura teste é usualmente realizada por um meio elástico que não afete significativamente o comportamento da estrutura. Recomenda-se que a frequência natural de vibração da estrutura de suporte, espumas de plástico ou barbantes elásticos, seja de no máximo 20% da frequência do primeiro modo de flexão da estrutura teste.

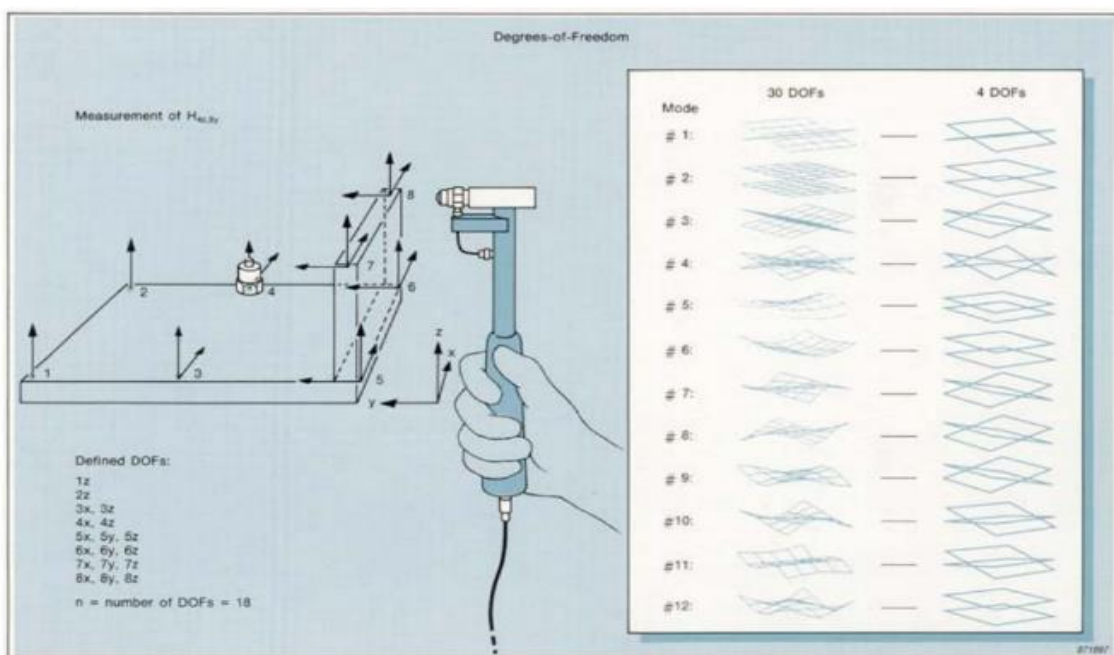
#### **2.4.2 Modelo Geométrico**

A escolha do número de transdutores de excitação e resposta utilizados definirá o modelo geométrico do teste, ou seja, quantos graus de liberdade serão atribuídos ao sistema. Maior será a precisão e menor será a chance de não identificar certos modos quanto maior o número de pontos escolhidos (PATRICK, 1985).

Esta fase também está associada ao número de graus de liberdade que será estipulado para a estrutura teste. Essa associação depende do objetivo do teste, da geometria da estrutura e do número de modos na faixa de frequência de interesse (BRÜEL; KJAER, 1988).

Oliveira (2015) ressalta que a identificação das frequências naturais de vibração de uma estrutura simples precisará de poucos transdutores, entretanto para a elaboração de um sistema matemático que represente o comportamento dinâmico de uma estrutura complexa será necessária a atribuição de tantos pontos quantos forem necessários para que nenhuma forma modal seja desconsiderada. A Figura 6 demonstra a diferença dos detalhes entre um experimento com 30 graus de liberdade e outro na mesma amostra com quatro.

Figura 6. Comparação entre as formas modais obtidas para um experimento com 30 graus de liberdade e outro com 4 graus de liberdade.



Fonte: Brüel e Kjaer (1988)

### 2.4.3 Sinais de Excitação e Formas de Excitação

RAMSEY (1976) e STROUD (1987) classificam três tipos de excitação, são eles: excitação aleatória, excitação senoidal e excitação transiente.

A Excitação por Impacto, utilizada neste estudo, faz parte da terceira classificação e é caracterizada por um sinal de excitação gerado pelo impacto de um Martelo de Impacto na estrutura teste.

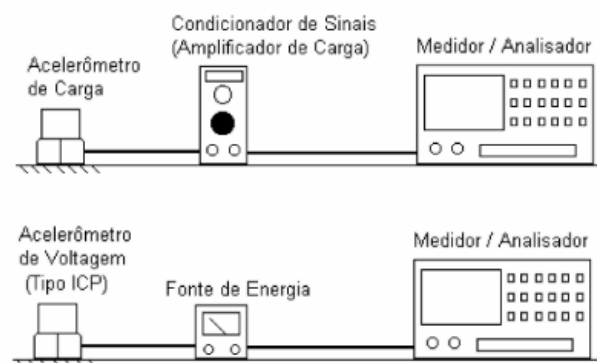
CRUZ (2006) destaca que as formas mais comuns de excitação aplicadas na análise modal experimental utilizam um martelo de impacto ou o excitador eletrodinâmico. Ambas as formas possuem sensores para a medição dos sinais de entrada e o excitador eletrodinâmico possibilita as excitações por sinais aleatórios ou senoidais.

#### 2.4.4 Medição da Excitação e Resposta

A medição dos sinais de excitação e resposta é realizada pelos transdutores que em sua maioria utilizam cristais piezoelétricos. A escolha do sensor para medição dos sinais de entrada depende do tipo de sinal escolhido e de características como temperatura, limite de carga e de choque, sensibilidade e resposta em frequência. Para a medição dos sinais de saída usualmente utiliza-se os acelerômetros piezoelétricos, com preferência para os acelerômetros ICP pois não necessitam de amplificadores de carga. Há acelerômetros que não possuem um circuito integrado e, portanto, precisam de um amplificador de carga. A Figura 7 demonstra ambos os tipos de acelerômetros.

Fonte: Cruz (2006)

Figura 7. (a) Acelerômetro de carga e seu condicionador e (b) acelerômetro ICP com sua fonte externa



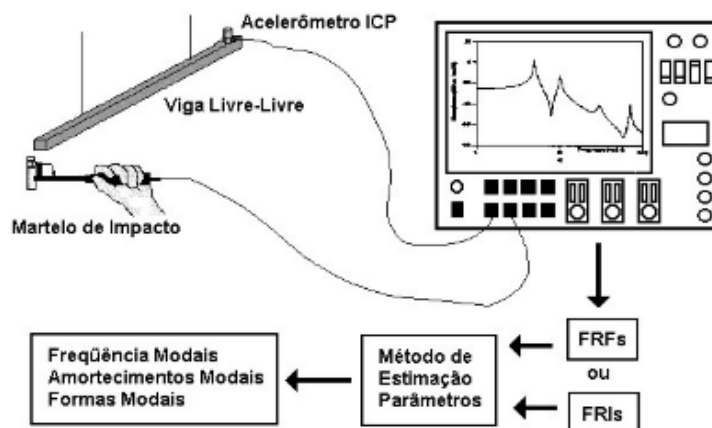
#### 2.4.5 Testes com Martelo de Impacto

A Figura 8 representa os equipamentos necessários para a realização de um teste de impacto. Os testes com martelo de impacto são muito comuns devido à sua simplicidade,



facilidade e rapidez, porém estão vulneráveis a erros humanos como a ocorrência de um duplo impacto e a variação da força de impacto a cada medição.

Figura 8. Teste modal usando excitação por impacto



Fonte: Cruz (2006)

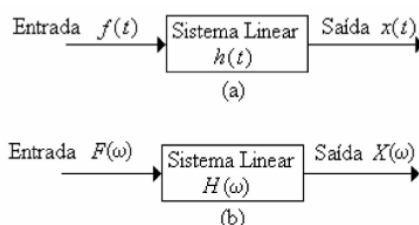
Durante a realização do teste, os sinais de entrada e saída serão captados pelos transdutores de força e aceleração respectivamente e serão enviados, após o condicionamento, ao analisador de sinais, que processará as Funções de Resposta em Frequência (FRFs) e assim identificará os parâmetros modais (CRUZ, 2006).

#### 2.4.6 Estimação das FRFs

A análise modal experimental clássica obtém os parâmetros modais a partir das FRFs. A obtenção das FRFs depende do espectro de frequência da força de excitação (sinal de entrada) e do espectro do movimento de resposta (sinal de saída). Estes espectros são obtidos através dos sinais analógicos captados pela célula de carga e pelo acelerômetro e são, posteriormente, enviados a um analisador de sinais e então transformados para o domínio da frequência através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) (NEWLAND, 1984). Há modelos de identificação que trabalham com Funções Resposta aos Impulsos (FRIs), no domínio no tempo, entretanto as FRIs são obtidas através da transformada inversa de Fourier das FRFs, sendo, portanto, a obtenção das FRFs sempre necessária (CRUZ, 2006).

A Figura 9 representa o funcionamento dos modelos de entrada e saída nos domínios do tempo e da frequência.

Figura 9. Modelos de entrada e saída em sistemas lineares: (a) No domínio do tempo e (b) no domínio na frequência



Fonte: Cruz (2006)

### 2.4.7 Identificação dos Parâmetros Modais

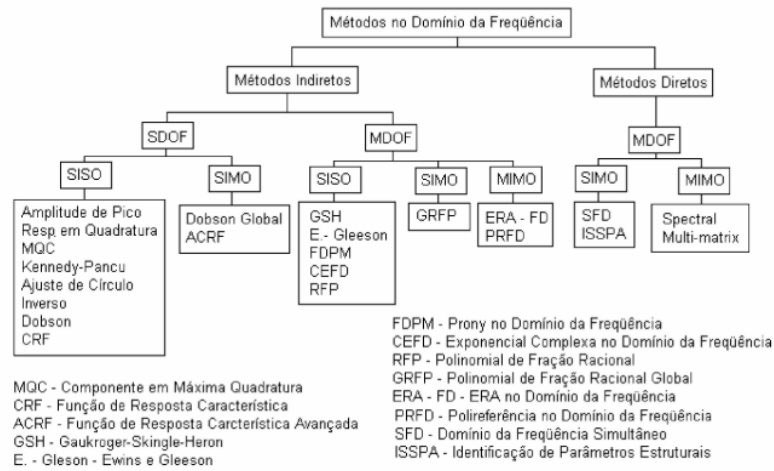
Ambos os métodos, no domínio do tempo e no domínio da frequência, podem ser divididos entre métodos indiretos (modais) e métodos diretos. Os métodos indiretos identificam o modelo modal (frequências naturais, amortecimentos modais e formas modais), enquanto os métodos diretos identificam o modelo espacial (matrizes de massa, rigidez e amortecimento). Cruz (2006) destaca mais duas classificações, uma quanto à relação do número de modos identificados simultaneamente e outra quanto ao número de pontos de medição usados simultaneamente durante o ensaio.

Métodos multimodos (MDOF – “Multiple Degree of Freedom methods”) identificam vários modos simultaneamente, enquanto métodos que identificam um modo de cada vez (SDOF – “Single Degree of Freedom methods”), são indicados para sistemas de baixo amortecimento e fraco acoplamento entre os mesmos.

Quando se tem apenas um medidor para o sinal de entrada e um medidor para o sinal de saída, o sistema é chamado SISO (“Single-Input Single-Output”). Pode-se ter um sistema MIMO (“Multiple-Input Multiple-Output”) com vários sinais de entrada e vários sinais de saída simultâneos.

A Figura 10 exemplifica os métodos de identificação no domínio da frequência e suas várias classificações.

Figura 10. Métodos de identificação de parâmetros no domínio da frequência

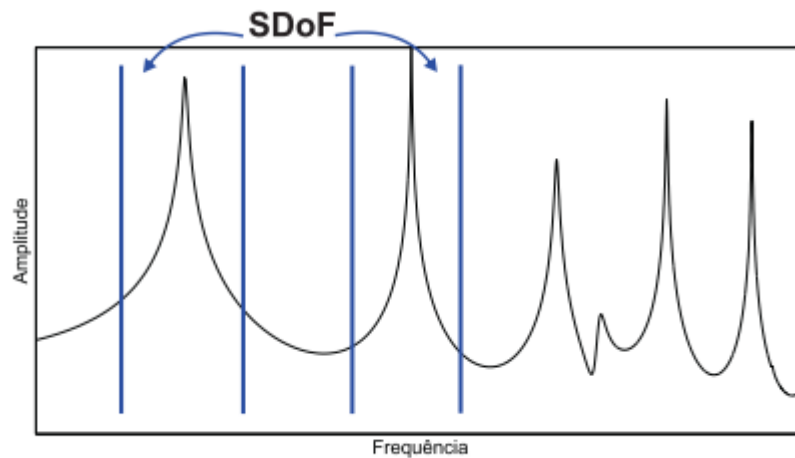


Fonte: Maia e Silva (1997)

## 2.4.8 Análise modal em estruturas simples

Oliveira (2015) ressalta que, para estruturas simples, utilizando o método SDOF, é possível extrair os parâmetros modais através da avaliação dos picos da FRF, onde cada função é tratada como um sistema de um grau de liberdade. As frequências naturais são observadas na magnitude da resposta e se encontram onde picos da FRF estão posicionados (BRÜEL; KJAER, 1988). A Figura 11 exemplifica uma possível análise para este tipo de método.

Figura 11. Métodos de único grau de liberdade



Fonte: Oliveira (2015)

## 2.5 MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Diversos fatores devem ser considerados durante a avaliação de resultados de materiais da construção civil submetidos a testes de aquecimento e resfriamento como: sua composição; porosidade, permeabilidade, formas de resfriamento e forma geométrica. Mohamedbhai (1986) mostra em seus estudos o impacto que a variação do tempo de exposição e a taxa de aquecimento e resfriamento têm nos resultados finais de resistência à compressão, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Resistência à compressão residual para concretos submetidos a diferentes tempos de exposição e diferentes taxas de aquecimento e resfriamento

<b>Temperatura máxima, °C</b>	20	200	400	600	800
<b>Intervalo de resistência residual, %</b>	100	50-92	45-83	40-69	20-34

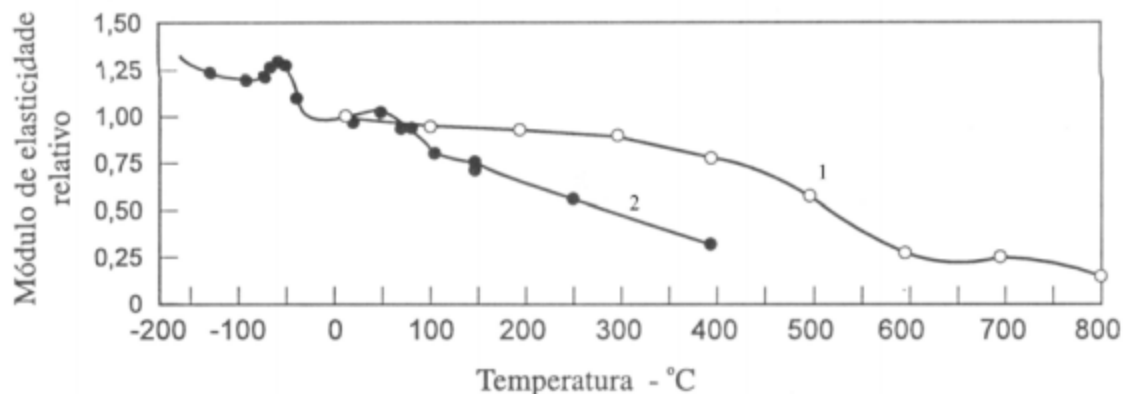
Fonte: Mohamedbhai (1986)

Outro problema presente é que em diversos estudos as condições de contorno e detalhes sobre os ensaios não são descritas de forma clara e objetiva, o que gera uma má padronização dos resultados e uma dificuldade na hora de estipular referências a serem seguidas.

No geral, para concretos, observa-se que a resistência residual das amostras diminui com o aumento da temperatura de aquecimento. Georgali e Tsakiridis (2004) descrevem pontos críticos de temperatura onde ocorrem perdas bruscas de resistência. Percebe-se a primeira queda na resistência a compressão na faixa entre 200°C e 250°C, a 300°C a resistência residual é em torno de 85% a 60%, e a última a 550°C onde a resistência residual é em torno 45% a 30%. Petrucci (1973) ainda faz menção a uma queda importante na resistência que acontece quando as temperaturas alcançam níveis acima de 600°C e a resistência mecânica fica na ordem dos 50% do valor de referência.

Um fator seriamente afetado pela temperatura é o módulo de elasticidade. Amostras submetidas a 200°C apresentam módulos de elasticidade na faixa de 70 a 80% do valor de referência e a 430°C, na faixa de 40 a 50% (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A Figura 12 traz o resultado de dois estudos feitos por pesquisadores diferentes a respeito do comportamento do módulo de elasticidade do concreto.

Figura 12. Influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Neville (1997)

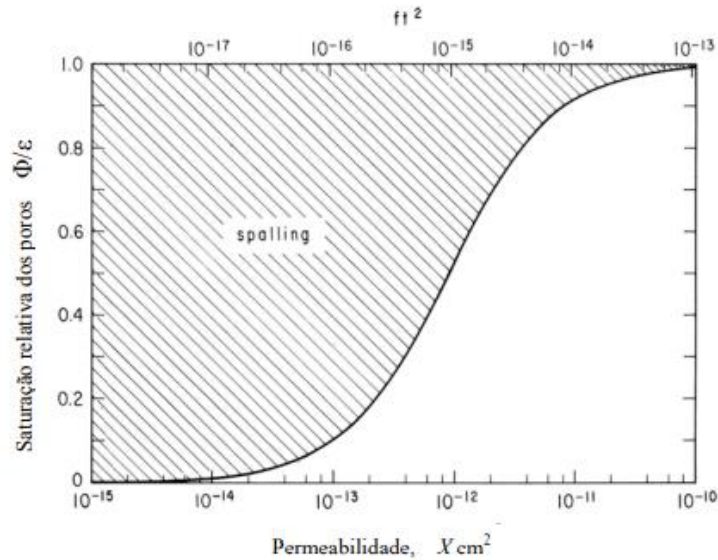
### 2.5.1 Mudanças Físicas

Os mecanismos de deterioração são divididos em físicos e químicos e geralmente ocorrem simultaneamente e de forma associada.

As tensões internas geradas pelo aquecimento representam o principal mecanismo físico de degradação no concreto e são provocadas pela evaporação da água ou pela dilatação térmica diferencial entre os materiais presentes. A evaporação da água associada a baixa permeabilidade das amostras pode resultar em lascamentos superficiais devido a formação de vapor dentro do material (GEORGALI; TSAKIRIDIS, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A ocorrência de lascamentos explosivos, fenômeno conhecido como *spalling*, é relacionada diretamente com a permeabilidade e taxa de aumento da temperatura (HARMATHY, 1973). Esta relação pode ser observada na Figura 13 que demonstra a probabilidade de *spalling* para um grupo específico de concretos onde foram correlacionadas a umidade/porosidade e permeabilidade dos mesmos.

Figura 13. Curva de probabilidade de spalling para um grupo particular de concretos



Fonte: Harmathy (1973)

O concreto é bastante resistente ao fogo devido as características térmicas dos seus constituintes. O coeficiente de dilatação térmica da pasta de cimento usualmente varia entre  $11 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$  e  $20 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ . A Tabela 2 mostra os coeficientes de dilatação térmica dos agregados, a Tabela 3, a influência do teor de agregado sobre o coeficiente de dilatação térmica na pasta e a Tabela 4, os coeficientes de dilatação lineares de concretos de diversos agregados (NEVILLE, 1997) e (BONNELL; HARPER, 1951).

Tabela 2. Coeficiente de dilatação térmica dos agregados

Tipos de agregado	Coeficiente de dilatação linear, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Granito	5,8
Quartzito	11,7
Dolerito	7,7
Arenito	10,1
Calcário	4,5
Pedra de Portland	4,3
Escória de alto forno	7,9

Fonte: Bonnell e Harper (1951)

Tabela 3. Influência do teor de agregado sobre o coeficiente de dilatação térmica da pasta

<b>Relação cimento:areia</b>	<b>Coeficiente de dilatação térmica linear a dois anos de idade, <math>10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}</math></b>
Pasta	18,5
1:1	13,5
1:3	11,2
1:6	10,1

Fonte: Neville (1997)

Tabela 4. Coeficiente de dilatação térmica linear de concreto 1:6 com diversos tipos de agregados

<b>Tipos de agregado</b>	<b>Coeficiente de dilatação linear, <math>10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}</math></b>	
	Curado ao ar	Curado em água
Seixo	13,1	12,1
Granito	9,5	8,6
Quartzito	12,8	12,2
Dolerito	9,5	8,5
Arenito	11,7	10,1
Calcário	7,4	6,1
Pedra de Portland	7,4	6,1
Escória de alto forno	10,6	9,2
Escória expandida	12,1	9,2

Fonte: Bonnell e Harper (1951)

As diferenças nos coeficientes de dilatação térmica dos materiais constituintes do concreto resultam no surgimento de tensões durante um período de aquecimento, induzindo a fissurações. Além de fissurações, o concreto também sofre uma expansão e posterior retração devido ao resfriamento. Todos esses mecanismos somados podem levar a danos significativos na estrutura da amostra e causar sua ruptura (GEORGALI; TSAKIRIDIS, 2005).

Outro fator importante a ser considerado é a condutividade térmica da amostra, ela quantifica a capacidade que um material possui de conduzir calor e é calculada através da relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura (NEVILLE, 1997). A composição mineralógica e a microestrutura exercem grande impacto nessa determinação. A baixa condutividade leva a amostras mais resistentes ao fogo e vice-versa. Harmathy (1973) destaca que a temperatura também impacta na condutividade térmica do concreto e que para temperaturas acima de  $760^\circ\text{C}$  as diferenças de condutividade térmica tendem a diminuir.

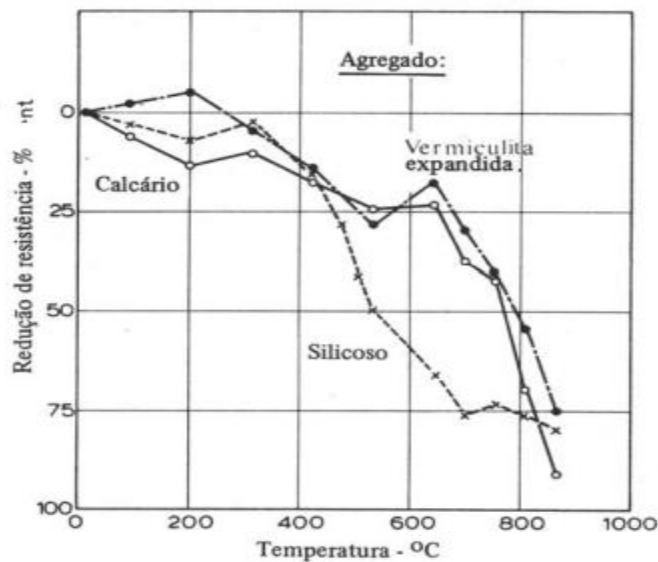
### 2.5.2 Mudanças químicas

Os componentes do concreto passam por reações de decomposição quando aquecidos, a altas temperaturas a pasta de cimento é instável e os agregados apresentam características bastante variadas. A absorção de calor por essas reações de decomposição muitas vezes é um mecanismo útil na resistência ao fogo do concreto pois retarda o fluxo de calor (HARMATHY, 1973).

Os materiais desidratam em diversas faixas de temperatura e levam a quedas significativas da resistência devido a mudanças na estrutura do concreto (LEES, 1992). Desidratação como a do hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  levam a retrações na ordem de 33% e, em situações de incêndios extinguidos por água, ocorre a reidratação do óxido de cálcio  $\text{CaO}$ , gerado pelo aquecimento. Este processo resulta em uma nova expansão que pode chegar a 44%. Tudo isso deve ser considerado na hora de avaliar os danos finais sofridos pela estrutura (YÜSER; AKÖZ; ÖZTÜRK, 2004).

A Figura 14 detalha um limite amplamente aceito da integridade estrutural para diversos concretos de cimento Portland na ordem de 600°C (ABRAMS, 1971, apud NEVILLE, 1997). A partir desta temperatura ocorre uma redução acentuada da resistência à compressão.

Figura 14. Redução da resistência à compressão do concreto sem aplicação de carga e ensaiado quente.



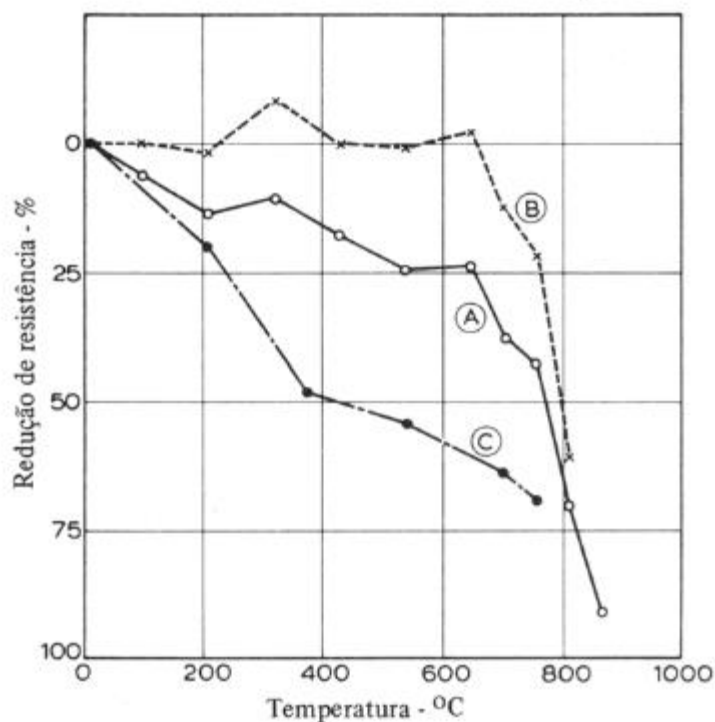
Fonte: Abrams (1971) apud Neville (1997)



### 2.5.3 Análise de fatores externos

De forma semelhante a análise modal experimental, as condições de contorno são extremamente importantes na análise dos materiais submetidos a altas temperaturas. Ensaios realizados em diferentes condições de carregamento e em diferentes momentos apresentam resultados diferentes para um mesmo conjunto de amostras como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15. (A) aquecido sem carregamento e ensaiado quente; (B) aquecido com carga igual a 0,4 da resistência e ensaiado quente; (C) aquecido sem carregamento e ensaiado depois de 7 dias conservados a 21 °C.



Fonte: Abrams (1971) apud Neville (1997)

A influência do método de resfriamento das amostras é alvo cada vez maior de estudo. Há diversas formas de realiza-lo e tem-se como exemplos os métodos utilizados por Yüser, Aköz e Öztürk (2004). São eles: resfriamento a ar e resfriamento através da submersão em água. Shoaib, Ahmed e Balaha (2001) utilizaram três métodos de resfriamento e concluíram que há uma diferença notável nos resultados.

A Tabela 5 e Tabela 6 mostram um comparativo do impacto de diferentes métodos de resfriamento na resistência à compressão de amostras de concreto obtidos por Carvalho, 2001 e Souza e Moreno Jr, 2010. Carvalho empregou corpos de prova cilíndricos com 100mm de diâmetro e 200mm de altura.

Tabela 5. Redução da resistência à compressão de acordo com o tipo de tratamento aos espécimes após aquecimento.

<b>15 MPa</b>	<b>Temperatura (°C)</b>				
	400	500	600	700	800
Ruptura à quente	70,9%	62,5%	59,7%	59,1%	49,1%
Resfriamento brusco	73,6%	58,7%	55,3%	48,33%	30,7%
Resfriamento lento	84,1%	82,3%	76,8%	56,7%	38,5%
<b>25 MPa</b>					
Ruptura à quente	70,1%	72,9%	63,8%	56,0%	47,0%
Resfriamento brusco	76,6%	72,3%	64,2%	58,7%	47,7%
Resfriamento lento	87,7%	79,2%	73,8%	71,7%	44,4%

Fonte: Carvalho (2001)

Tabela 6. redução da resistência à compressão e do módulo de deformação de acordo com o tipo de resfriamento dos espécimes após aquecimento

	<b>Resistência à compressão</b>			<b>Módulo de deformação</b>		
	300°C	600°C	900°C	300°C	600°C	900°C
Resfriamento lento	88%	86%	8%	50%	30%	3%
Resfriamento brusco	81%	73%	0%	41%	19%	0%

Fonte: Souza e Moreno Jr (2010)

Para amostras submetidas a baixas temperaturas de aquecimento foi observada uma recuperação maior da resistência à compressão e módulo de deformação após a reidratação. Este comportamento também foi identificado para faixas maiores de temperatura (SOUZA; MORENO JR, 2010).

Autores como Mohamedbhai, 1986 e Sarshar e Khoury, 1993 relatam que o tempo de exposição impacta os resultados finais, porém não de forma significativa, especialmente a temperaturas acima de 600°C. Apesar disso deve-se considerar o tempo de exposição na hora de planejar os ensaios.

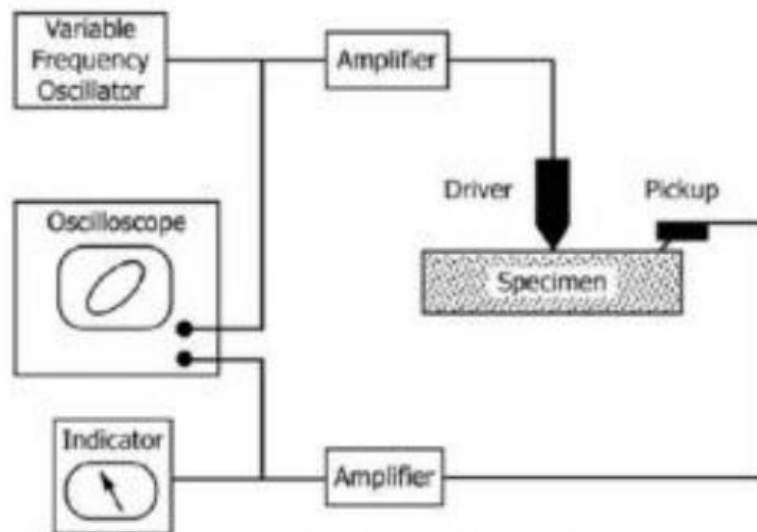
## 2.6 NORMAS

A norma americana *C215 – 14 Standart Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens* (ASTM, 2014) padroniza a medição das frequências naturais transversais, longitudinais e torcionais de vibração de cilindros e prismas de espécimes de concreto. Ela tem como objetivo final a

utilização das frequências de ressonância para o cálculo dos módulos dinâmicos de elasticidade, rigidez e coeficiente dinâmico de Poisson.

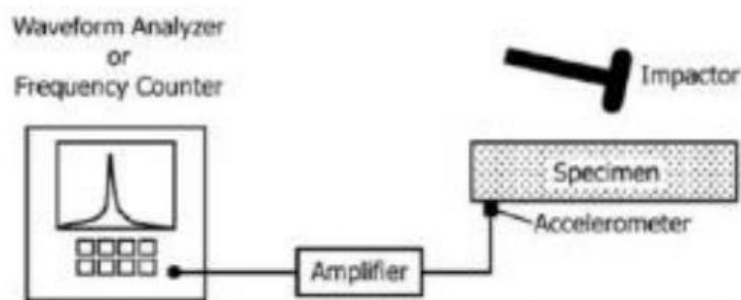
Viu-se na seção 2.4 alguns métodos de excitação utilizados na AME. De acordo com a norma americana ASTM C215 – 14 as frequências naturais de vibração devem ser determinadas através de dois procedimentos como observado na Figura 16 e na Figura 17: o método de vibração forçada (excitador eletrodinâmico) ou o método de vibração por impacto (teste com martelo de impacto). A norma segue em quase toda sua extensão os fundamentos da análise modal experimental já vistos na seção 2.4, descrevendo os tipos de suporte, equipamentos e sinais digitais a serem utilizados.

Figura 16. Esquema de equipamentos para o teste de vibração forçada.



Fonte: ASTM C215, (2014)

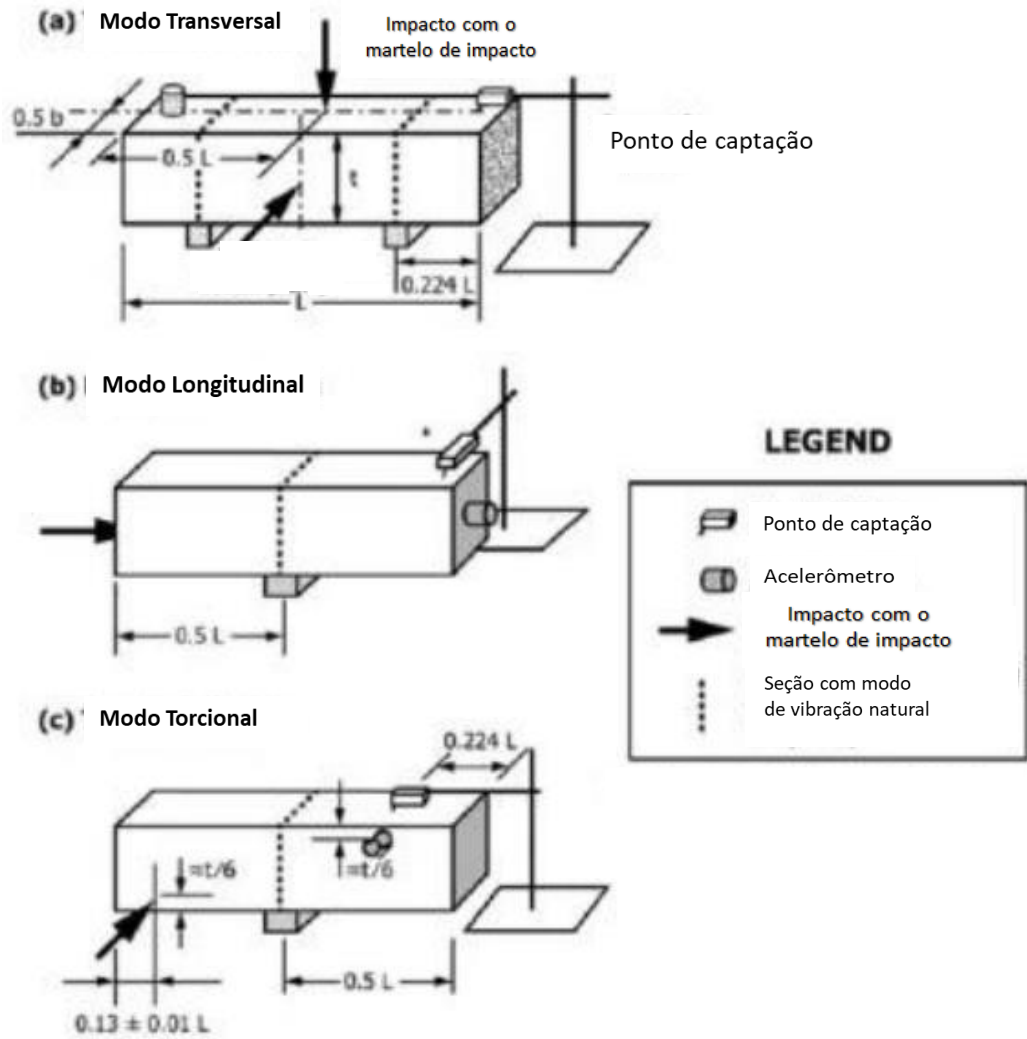
Figura 17. Esquema de equipamentos para o teste de vibração por impacto.



Fonte: ASTM C215, (2014)

A definição de qual frequência natural de vibração será medida é determinada pelo posicionamento correto dos locais de impacto (sinal de entrada), de fixação do acelerômetro (sinais de saída) e dos suportes. A Figura 18 mostra o correto posicionamento para a determinação de cada uma das frequências.

Figura 18. Localização dos transdutores para captação dos sinais de entrada e saída.



Fonte: ASTM C215, (2014)

A seguir, são representadas as fórmulas utilizadas para os cálculos dos módulos dinâmicos de elasticidade, rigidez e coeficiente de Poisson, de acordo com a norma ASTM C215.

### 2.6.1 Módulo dinâmico de elasticidade ( $E$ )

O módulo de elasticidade é a propriedade do material que correlaciona as deformações de um material quando exposto a tensões.

Os módulos de elasticidade dinâmico e estático diferem no método pelo qual são medidos. Usualmente o módulo de elasticidade dinâmico é maior na comparação com o módulo estático.

Calculado através da equação (2):

$$E_d = CMn^2 \quad (2)$$

Onde:

$C = 0,9464 \left( \frac{L^3 T}{bt^3} \right)$  para um prisma;

$M$  = massa da amostra, em kg;

$n$  = frequência natural transversal, em Hz;

$L$  = comprimento da amostra, em m;

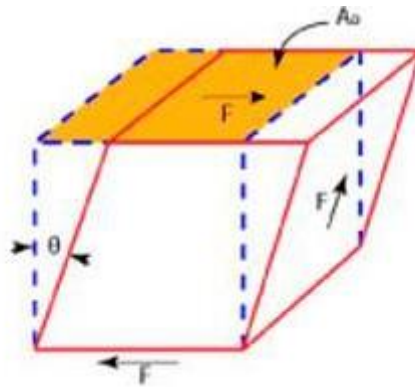
$t, b$  = dimensões da seção quadrada do prisma, em m,  $t$  sendo a direção em que o teste é conduzido;

$T$  = fator de correção que depende na razão do raio de giração,  $K$  (o raio de giração do cilindro é  $d/4$  e para um prisma é  $t/3,464$ ), para o comprimento da amostra,  $L$ , e o coeficiente de Poisson. A tabela 1 da norma ASTM C-215 fornece os valores para os vários valores de  $K/L$  e coeficiente de Poisson.

### 2.6.2 Módulo dinâmico de cisalhamento ( $G$ )

O módulo dinâmico de cisalhamento é a razão entre a deformação elástica de cisalhamento e a uma tensão cisalhante como representado na figura 19. Ele rege o comportamento elástico frente a forças cortantes ou de torção.

Figura 19. Representação do esforço de cisalhamento



Fonte: Sonelastic (2021)

O módulo dinâmico de cisalhamento é calculado, de acordo com a norma ASTM C215, através da equação (3):

$$G_d = BM(n^n)^2 \quad (3)$$

Onde:

$n^n$  = frequência natural torsional, em Hz;

$B = (4L R/A)$ , em  $m^{-1}$ ;

$R$  = fator de forma;

$R = 1$  para cilindros circulares;

$R = 1,183$  para seções quadradas do prisma

$R = (a/b + b/a)/[4a/b - 2,52(a/b)^2 + 0,21(a/b)^6]$  para prismas retangulares onde as dimensões da seção são  $a$  e  $b$ , em metros, sendo  $a$  menor que  $b$ ;

$A$  = área da seção da amostra, em  $m^2$ ;

$L$  = comprimento da amostra, em m.

### 2.6.3 Coeficiente dinâmico de Poisson ( $\mu$ )

O coeficiente dinâmico de Poisson define a relação entre a deformação transversal do material em relação a direção de aplicação da carga. É um fator que correlaciona deformações ortogonais e por isso é uma grandeza adimensional.

Calculado através da equação (4):

$$\mu = \left(\frac{Ed}{2G}\right) - 1 \quad (4)$$

#### 2.6.4 Utilização das frequências naturais de ressonância como alternativa

Não há, atualmente, uma norma brasileira para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto através da frequência natural de vibração, porém a *NBR 8802: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica* (ABNT, 2019) pode ser utilizada como um passo na determinação, pois permite o uso da fórmula (5), presente na norma *C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete* (ASTM, 2016), para o cálculo de forma semelhante à vista na seção anterior com a frequência de vibração e a norma C215.

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (5)$$

Onde:

$V$  = velocidade do pulso, em m/s;

$\rho$  = massa específica do concreto, em kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$  = coeficiente dinâmico de Poisson (usualmente 0,20).

Para a determinação da velocidade de propagação do pulso são utilizados pulsos ultrassônicos. Desta maneira é possível medir o tempo que o impulso leva para sair de uma extremidade da amostra até a outra e assim calcular a sua velocidade.

#### 2.6.5 Ensaio não-destrutivo

Ensaio não destrutivo são poderosas ferramentas pois permitem resultados precisos sem danificar o objeto de estudo, como é o caso de estruturas reais, além de possibilitarem que a amostra seja reutilizada para outros ensaios. Ensaio dinâmico como os descritos nos parágrafos anteriores fornecem aos projetistas informações a respeito da rigidez e amortecimento além de possibilitarem a sua repetição quantas vezes seja necessário ao longo da vida útil da estrutura (DIÓGENES et al, 2011).

Torna-se necessário o aprimoramento dos ensaios não-destrutivos. Há uma demanda cada vez maior por monitoramentos contínuos e em tempo real da integridade estrutural de diversos elementos nos setores industriais. Além da vantagem de não danificar a estrutura, fator muito importante principalmente em ambientes agressivos, os ensaios não-destrutivos são de rápida execução, possuem um custo menor e podem ser executados em campo.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 PROPOSTA**

O objetivo deste estudo é analisar a influência dos fatores, abaixo enumerados, na frequência natural transversal de vibração de corpos de prova retangulares de argamassa estrutural:

1. Temperatura de Aquecimento;
2. Hidratação;
3. Resistência do Corpo de Prova;
4. Método de Resfriamento.

Foram realizados ensaios, no Laboratório de Acústica da Universidade Federal de Santa Maria, seguindo as instruções da norma ASTM C215 descritas no capítulo 2 desse trabalho. Os corpos de prova foram cedidos pela professora Dra. Raquel Brondani, após o aquecimento prévio dos mesmos.

Para cada um dos fatores analisados, foram estipulados parâmetros para a realização dos ensaios. Para a análise da temperatura de aquecimento, as amostras foram expostas a nove temperaturas de aquecimento, de 100°C a 900°C. Para a análise da hidratação, as amostras foram ensaiadas no dia do aquecimento e após o período de vinte e oito dias.

Foram utilizadas argamassas de três resistências nominais distintas, sendo elas de 4 MPa, 12 MPa e 20 MPa. A resistência dos corpos de prova foi verificada através dos ensaios de compressão realizados pela professora doutora Raquel Brondani.

Foram utilizados dois métodos de resfriamento: o primeiro, denominado brusco, onde as amostras eram submergidas em água imediatamente após a retirada do forno, e o segundo, denominado lento, onde as amostras eram arrefecidas à temperatura ambiente. A Figura 20 apresenta o momento da retirada das amostras do forno e sua imersão em água à temperatura ambiente pelo bombeiro.

No total foram ensaiados 240 corpos de prova no intervalo de 10 meses.

##### **3.1.1 Hidratação**

Foi considerado como reidratação o período de 28 dias entre a realização do primeiro ensaio e segundo ensaio.



### 3.1.2 Resistência

Foram utilizadas argamassas de assentamento estrutural com resistências nominais de 4MPa, 12MPa e 20MPa garantidas pelos fabricantes.

### 3.1.3 Método de resfriamento

O resfriamento lento consistiu no arrefecimento das amostras a temperatura ambiente. Após atingir a temperatura prevista o forno foi aberto e esperou-se as amostras atingirem a temperatura ambiente.

Para o resfriamento brusco as amostras eram retiradas do forno, pelos bombeiros, logo após atingirem a temperatura prevista e imergidas em água a temperatura ambiente durante o período de 5 minutos.

Figura 20. Imersão das amostras em água à temperatura ambiente após seu aquecimento (Resfriamento Brusco)



## 3.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

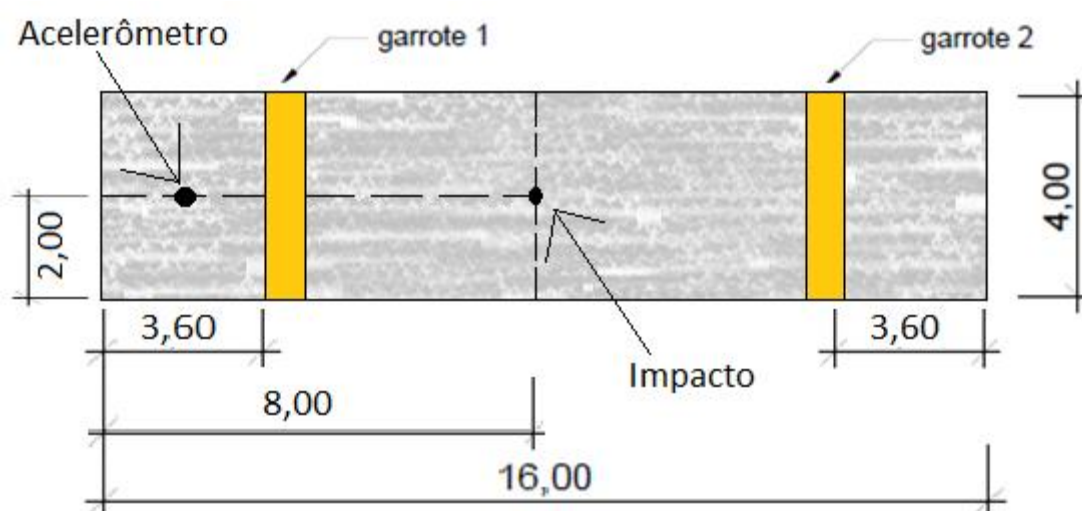
### 3.2.1 Descrição dos corpos de prova e modelo geométrico

As dimensões dos corpos de prova estão apresentadas abaixo:

- Comprimento: 16cm
- Largura: 4cm
- Altura: 4cm

A Figura 21 mostra, no corpo de prova, os locais de apoio, de posicionamento do acelerômetro e de impacto padronizados pela norma ASTM C215.

Figura 21. Vista superior com representação geométrica dos pontos de apoio, posicionamento do acelerômetro, local de impacto e dimensões da amostra.



Fonte: Autor

Optou-se pela suspensão dos corpos de prova através de elásticos devido a menor interferência causada pelos mesmos no gráfico de frequência natural transversal de vibração.

### 3.2.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios foram:

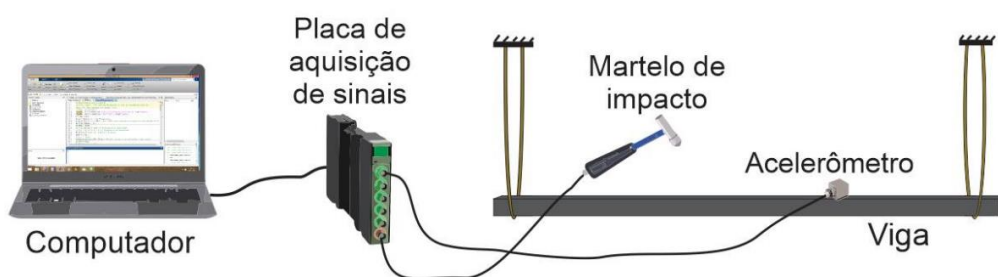
- Placa de aquisição de sinais de 6 entradas B&K LAN-XI tipo 3050-B-060;
- Acelerômetro Uniaxial B&K tipo 4533-B;
- Martelo de impacto B&K tipo 8206;
- Calibrador de acelerômetro B&K tipo 4294;

- Cabos BNC-microDOT;
- Computador.

### 3.2.3 Montagem do sistema e realização das medições

Pode-se observar nas figuras Figura 22 e Figura 23, um esquema do sistema utilizado para a execução dos ensaios e do sistema montado no laboratório de acústica da Universidade Federal de Santa Maria.

Figura 22. Representação esquemática do sistema necessário para execução do ensaio



Fonte: Oliveira (2015)

Figura 23. Sistema montado para execução do ensaio



Fonte: Autor

Para a avaliação de cada um dos fatores, enumerados no início do capítulo, foram utilizados quatro corpos de prova, denominados neste estudo como bateria, para fins de facilitação da explicação. Cada um desses corpos de prova foi submetido a quatro impactos, gerando quatro leituras. O resultado utilizado para cada corpo de prova foi a média dessas quatro leituras e, posteriormente, foi feita a média das médias, gerando apenas um resultado por bateria de ensaio.

## 4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS GERAIS

A Tabela 7 apresenta um compilado dos resultados gerais obtidos para os valores de frequência natural transversal de vibração para cada bateria de ensaios.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de frequência natural transversal de vibração

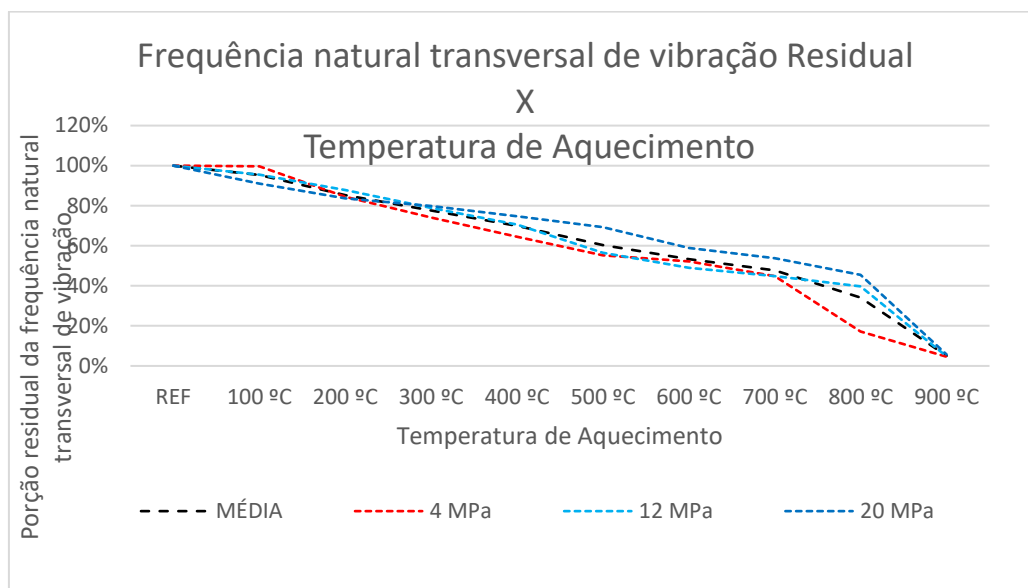
	REF	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
20 MPa RL SR	4110 Hz	3410 Hz	3300 Hz	3020 Hz	2690 Hz	2440 Hz	2110 Hz	1900 Hz	1640 Hz	940 Hz
20 MPa RB SR	3620 Hz	3480 Hz	3050 Hz	2930 Hz	2790 Hz	2710 Hz	2070 Hz	1700 Hz	1240 Hz	0 Hz
20 MPa RL CR	4130 Hz	3460 Hz	3300 Hz	2950 Hz	2750 Hz	2300 Hz	2000 Hz	1830 Hz	1450 Hz	0 Hz
20 MPa RB CR	3750 Hz	3790 Hz	3390 Hz	3510 Hz	3370 Hz	3260 Hz	2960 Hz	2910 Hz	2720 Hz	0 Hz
12 MPa RL SR	3770 Hz	3400 Hz	3090 Hz	2720 Hz	2330 Hz	1640 Hz	1560 Hz	1480 Hz	1260 Hz	720 Hz
12 MPa RB SR	3490 Hz	3460 Hz	3080 Hz	2750 Hz	2590 Hz	2350 Hz	1550 Hz	1260 Hz	1040 Hz	0 Hz
12 MPa RL CR	3810 Hz	3490 Hz	3210 Hz	2880 Hz	2470 Hz	1670 Hz	1700 Hz	1630 Hz	1360 Hz	0 Hz
12 MPa RB CR	3590 Hz	3640 Hz	3470 Hz	3200 Hz	2930 Hz	2570 Hz	2360 Hz	2190 Hz	2160 Hz	0 Hz
4 MPa RL SR	2880 Hz	2860 Hz	2420 Hz	2180 Hz	1820 Hz	1290 Hz	1370 Hz	1200 Hz	900 Hz	530 Hz
4 MPa RB SR	2860 Hz	2800 Hz	2320 Hz	1850 Hz	1600 Hz	1720 Hz	1320 Hz	1070 Hz	0 Hz	0 Hz
4 MPa RL CR	2960 Hz	2950 Hz	2580 Hz	2230 Hz	1970 Hz	1290 Hz	1520 Hz	1400 Hz	1110 Hz	0 Hz
4 MPa RB CR	3218 Hz	3280 Hz	2760 Hz	2600 Hz	2320 Hz	2320 Hz	2040 Hz	1700 Hz	0 Hz	0 Hz
Legenda										
RL	Resfriamento Lento									
RB	Resfriamento Brusco									
SR	Sem reidratação									
CR	Com reidratação									

Fonte: Autor

### 4.2 TEMPERATURA DE AQUECIMENTO

O Figura 24 demonstra a queda nos valores das frequências naturais transversais de vibração conforme o aumento na temperatura de aquecimento com as linhas pontilhadas representando a média do comportamento das amostras de 4 MPa, 12 MPa, 20 MPa e média geral.

Figura 24. Valor residual da frequência natural transversal de vibração x temperatura de aquecimento



Fonte: Autor

Para todas as amostras analisadas, foi observada uma clara tendência de queda nas frequências naturais transversais de vibração, conforme houve o aumento da temperatura de aquecimento.

As amostras apresentaram uma queda média aproximada de 8% no valor da frequência natural transversal de vibração para cada 100° C de aquecimento até a temperatura de 800° C.

As amostras expostas a temperatura de 200° C apresentaram, em média, uma frequência natural transversal de vibração de 85% do valor das amostras de referência (80% - 97%). A 500° C, em média, uma frequência natural transversal de vibração de 60% do valor de referência (44% - 87%). E à temperatura de 800° C as amostras apresentaram, em média, o valor da frequência natural transversal de vibração 34% do valor das amostras de referência (0% - 73%).

Em algumas amostras submetidas a temperaturas na ordem de 800° C e 900° C não foi possível realizar os ensaios devido à degradação ocorrida pela exposição à água fria logo após o aquecimento, ou devido à desagregação após o tempo de reidratação, como pode ser observado na Figura 25, na Figura 26, na Figura 27 e na Figura 28.

Figura 25. Amostras de 4 MPa e 20 MPa submetidas a 900°C e arrefecidos a temperatura ambiente



Fonte: Autor

Figura 26. Amostras de 12 MPa submetidas à 900°C e arrefecidas a temperatura ambiente



Fonte: Autor

Figura 27. Amostras de 12 MPa submetidas a 900°C após a submersão em água



Fonte: Autor

Figura 28. Amostras de 4MPa submetidas a 900°C após a submersão em água



Fonte: Autor



### 4.3 MÉTODO DE RESFRIAMENTO

Para as amostras sem reidratação, ou seja, as amostras ensaiadas no dia do aquecimento, ambos os métodos de resfriamento apresentaram valores de frequência natural transversal de vibração semelhantes, com uma variação média de 3% e máxima de 32%. As amostras submetidas ao resfriamento lento apresentaram os maiores valores para quase todas as amostras ensaiadas, como pode ser observado nas Tabelas: Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 8. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação 4 MPa

4 MPa	Amostras sem reidratação	Amostras com reidratação
	RL/RB	RL/RB
REF	1,01	0,92
100 °C	1,02	0,90
200 °C	1,04	0,93
300 °C	1,18	0,86
400 °C	1,14	0,85
500 °C	0,75	0,56
600 °C	1,04	0,75
700 °C	1,12	0,82
800 °C	-	-
900 °C	-	-
Média	1,04	0,82

Fonte: Autor

Tabela 9. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação 12 MPa

12 MPa	Amostras sem reidratação	Amostras com reidratação
	RL/RB	RL/RB
REF	1,08	1,06
100 °C	0,98	0,96
200 °C	1,00	0,93
300 °C	0,99	0,90
400 °C	0,90	0,84
500 °C	0,70	0,65
600 °C	1,01	0,72
700 °C	1,17	0,74
800 °C	1,21	0,63
900 °C	-	-
Média	1,01	0,83

Fonte: Autor

Tabela 10. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação 20 MPa

20 MPa	Amostras sem reidratação	Amostras com reidratação
	RL/RB	RL/RB
REF	1,14	1,10
100 °C	0,98	0,91
200 °C	1,08	0,97
300 °C	1,03	0,84
400 °C	0,96	0,82
500 °C	0,90	0,71
600 °C	1,02	0,68
700 °C	1,12	0,63
800 °C	1,32	0,53
900 °C	-	-
Média	1,06	0,80

Fonte: Autor

Após o período de reidratação, as amostras submetidas ao resfriamento lento apresentaram, em média, um valor da frequência natural transversal de vibração na ordem de 82% do valor das amostras submetidas ao resfriamento brusco.

Para as amostras reidratadas, foi observada uma diferença no comportamento da relação RL/RB (Resfriamento Lento/Resfriamento Brusco) nas menores faixas de temperatura em comparação com as maiores. A Tabela 11 demonstra essa diferença. Até a temperatura de aquecimento de 400° C, a relação RL/RB se mantém acima de 80% e após ser superado essa temperatura a relação RL/RB começa a diminuir consideravelmente atingindo seu mínimo na temperatura de 800° C, quando atinge em média 58%.

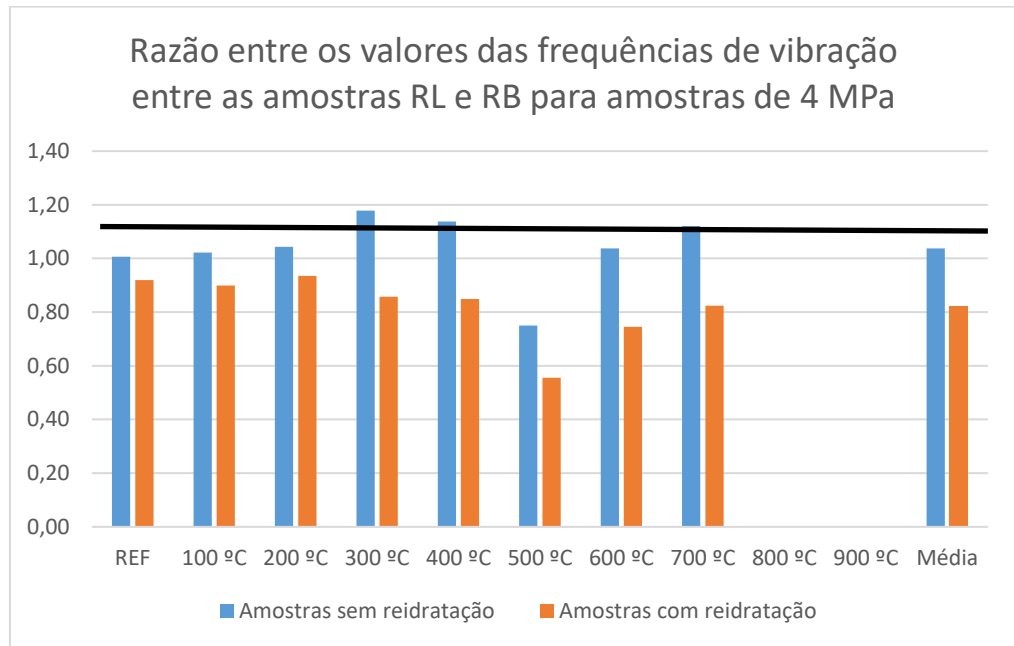
Tabela 11. Relação média entre valores de frequência obtidos por resfriamento lento e por resfriamento brusco para as amostras com e sem reidratação

MÉDIA	Amostras sem reidratação	Amostras com reidratação
	RL/RB	RL/RB
REF	1,07	1,03
100 °C	0,99	0,92
200 °C	1,04	0,94
300 °C	1,07	0,87
400 °C	1,00	0,84
500 °C	0,78	0,64
600 °C	1,02	0,71
700 °C	1,14	0,73
800 °C	1,27	0,58
900 °C	-	-
Média	1,03	0,82

Fonte: Autor

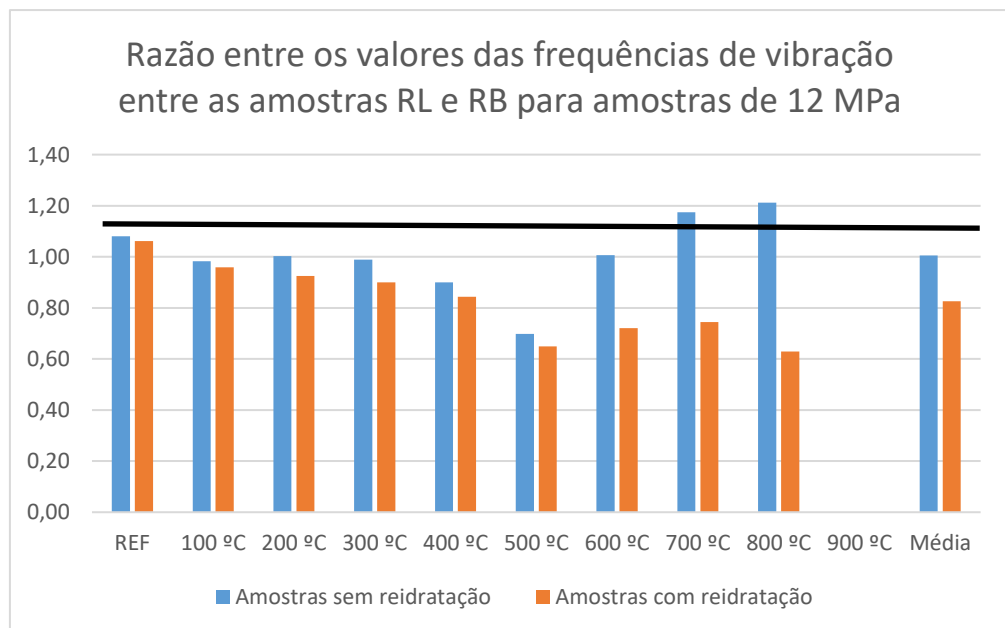
As Figuras Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32 demonstram a diferença no valor da frequência de vibração entre as amostras sem reidratação e com reidratação.

Figura 29. Razão entre os valores das frequências de vibração entre as amostras RL e RB para amostras de 4 MPa



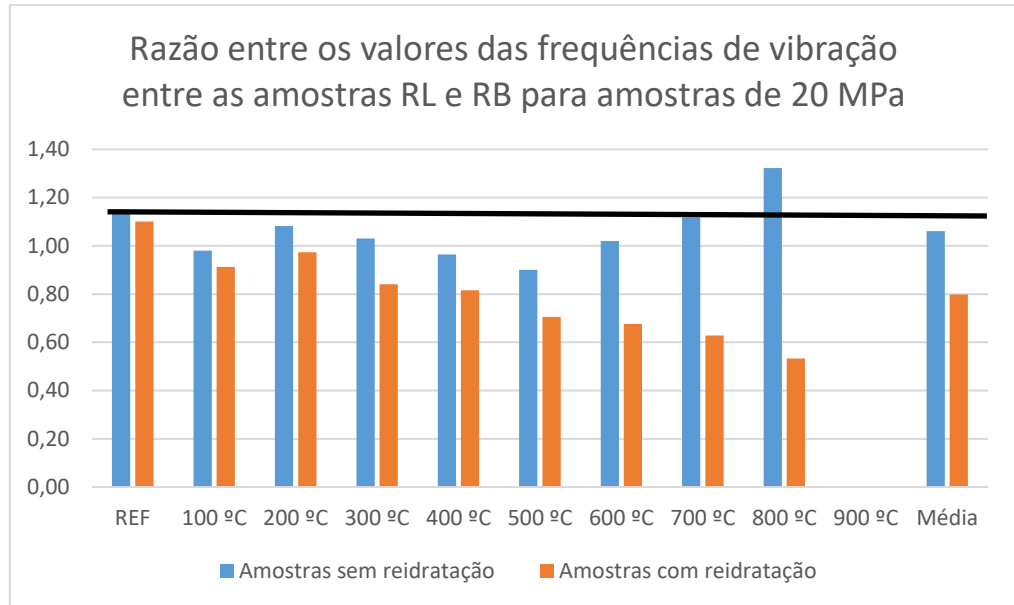
Fonte: Autor

Figura 30. Comparativo das frequências de vibração entre as amostras RL/RB para amostras de 12 MPa



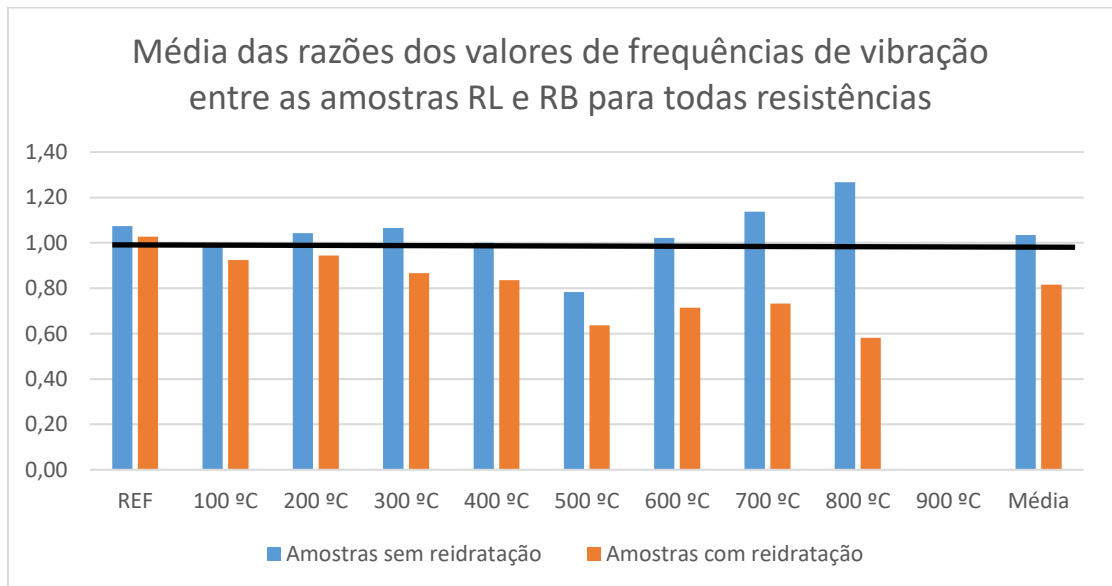
Fonte: Autor

Figura 31. Comparativo das frequências de vibração entre as amostras RL/RB para amostras de 20 MPa



Fonte: Autor

Figura 32. Comparativo médio das frequências de vibração entre as amostras RL/RB para amostras das três resistências



Fonte: Autor

#### 4.4 RESISTÊNCIA

As amostras moldadas com a argamassa de resistência nominal de 12MPa apresentaram valores de frequência natural transversal de vibração, em média, 25% (19% - 33%) maiores que as amostras moldadas com a argamassa de 4MPa, como pode ser observado na Tabela 12. A maior diferença foi observada nas amostras submetidas ao resfriamento brusco sem reidratação expostas a 400°C e a menor diferença nas amostras submetidas ao resfriamento brusco com reidratação a 500°C. Na comparação entre as amostras de 12MPa e 20MPa, as amostras de 20MPa apresentaram resultados, em média, 15% (11% - 22%) maiores de frequência natural transversal de vibração como pode ser observado na Tabela 13. A maior diferença foi observada nas amostras submetidas ao resfriamento lento sem reidratação expostas a temperatura de 500°C e a menor diferença foi observada nas amostras submetidas ao resfriamento lento com reidratação expostas a temperatura de 100°C. As amostras de 4MPa apresentaram os menores valores quando submetidas a temperaturas de 800°C e 900°C.

A Tabela 14 demonstra o aumento médio de 44% na comparação das amostras de 4MPa e 20MPa.

O aumento foi maior quando se comparou as amostras de 4MPa e 12MPa e menor para as resistências mais elevadas, 12MPa e 20MPa.

Tabela 12. Relação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 12 MPa / 4 MPa

Razão da Frequência Natural Transversal de Vibração				
4 MPa x 12 MPa	RL SR	RB SR	RL CR	RB CR
REF	1,31	1,22	1,29	1,12
100 °C	1,19	1,24	1,18	1,11
200 °C	1,28	1,33	1,24	1,26
300 °C	1,25	1,49	1,29	1,23
400 °C	1,28	1,62	1,25	1,26
500 °C	1,27	1,37	1,29	1,11
600 °C	1,14	1,17	1,12	1,16
700 °C	1,23	1,18	1,16	1,29
800 °C	1,40	-	1,23	-
900 °C	1,36	-	-	-
Média	1,27	1,33	1,23	1,19
Média Geral	1,25			

Tabela 13. Relação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 20 MPa / 12 MPa

Razão da Frequência Natural Transversal de Vibração				
12 MPa x 20 MPa	RL SR	RB SR	RL CR	RB CR
REF	1,09	1,04	1,08	1,04
100 °C	1,00	1,01	0,99	1,04
200 °C	1,07	0,99	1,03	0,98
300 °C	1,11	1,07	1,02	1,10
400 °C	1,15	1,08	1,11	1,15
500 °C	1,49	1,15	1,38	1,27
600 °C	1,35	1,34	1,18	1,25
700 °C	1,28	1,35	1,12	1,33
800 °C	1,30	1,19	1,07	1,26
900 °C	1,31	-	-	-
Média	1,22	1,13	1,11	1,16
Média Geral	1,15			

Fonte: Autor

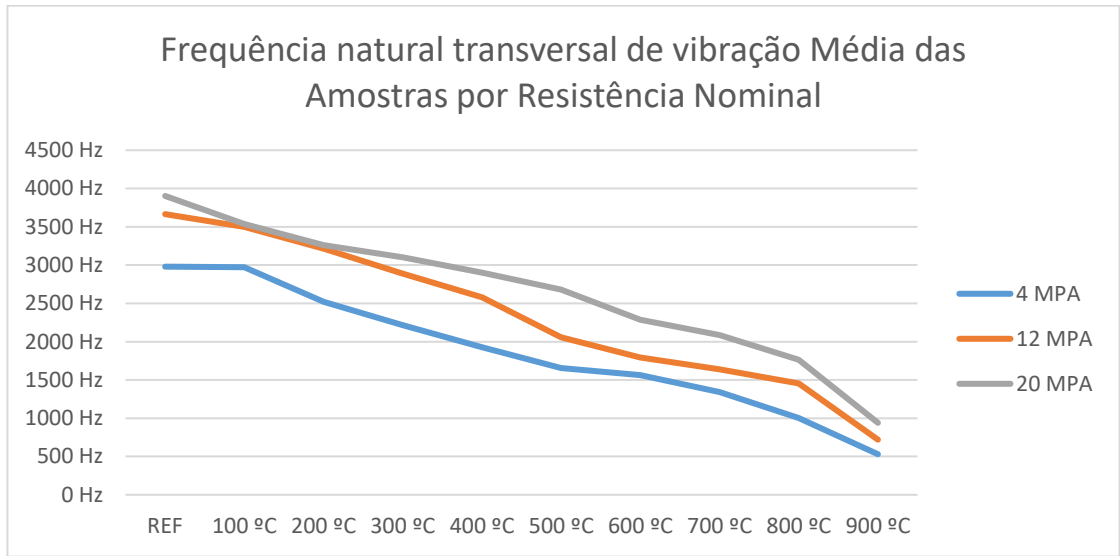
Tabela 14. Relação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 20 MPa / 4 MPa

Razão da Frequência Natural Transversal de Vibração				
4 MPa x 20 MPa	RL SR	RB SR	RL CR	RB CR
REF	1,43	1,27	1,40	1,17
100 °C	1,19	1,24	1,17	1,16
200 °C	1,36	1,31	1,28	1,23
300 °C	1,39	1,58	1,32	1,35
400 °C	1,48	1,74	1,40	1,45
500 °C	1,89	1,58	1,78	1,41
600 °C	1,54	1,57	1,32	1,45
700 °C	1,58	1,59	1,31	1,71
800 °C	1,82	-	1,31	-
900 °C	1,77	-	-	-
Média	1,55	1,49	1,36	1,36
Média Geral	1,44			

Fonte: Autor

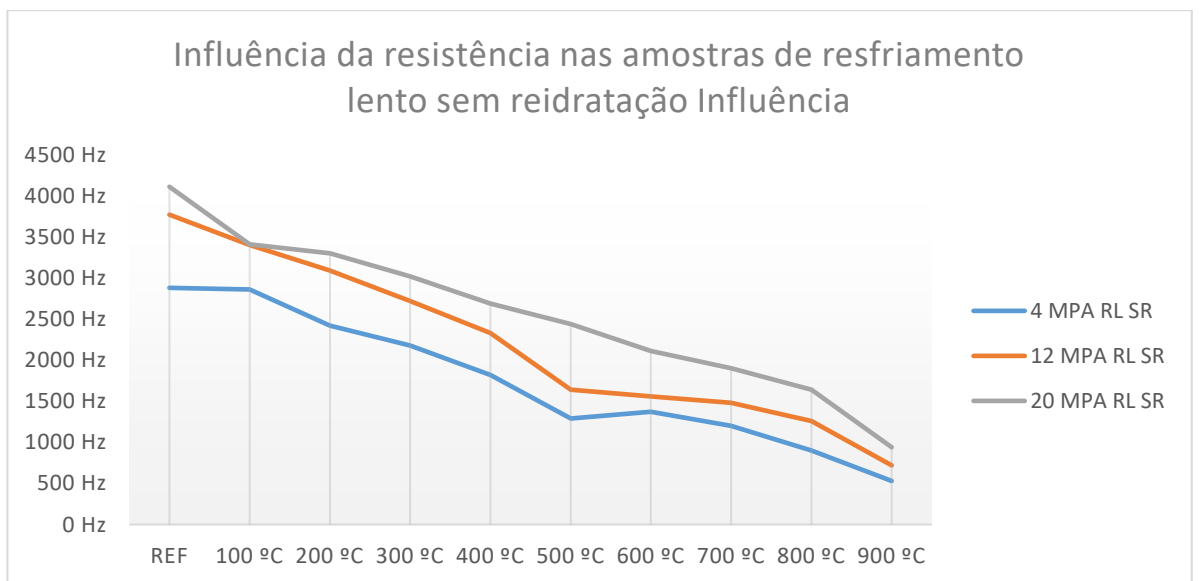
As Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37 demonstram o aumento na frequência natural transversal de vibração conforme o aumento de resistência das amostras para todas as combinações de resultados.

Figura 33. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal



Fonte: Autor

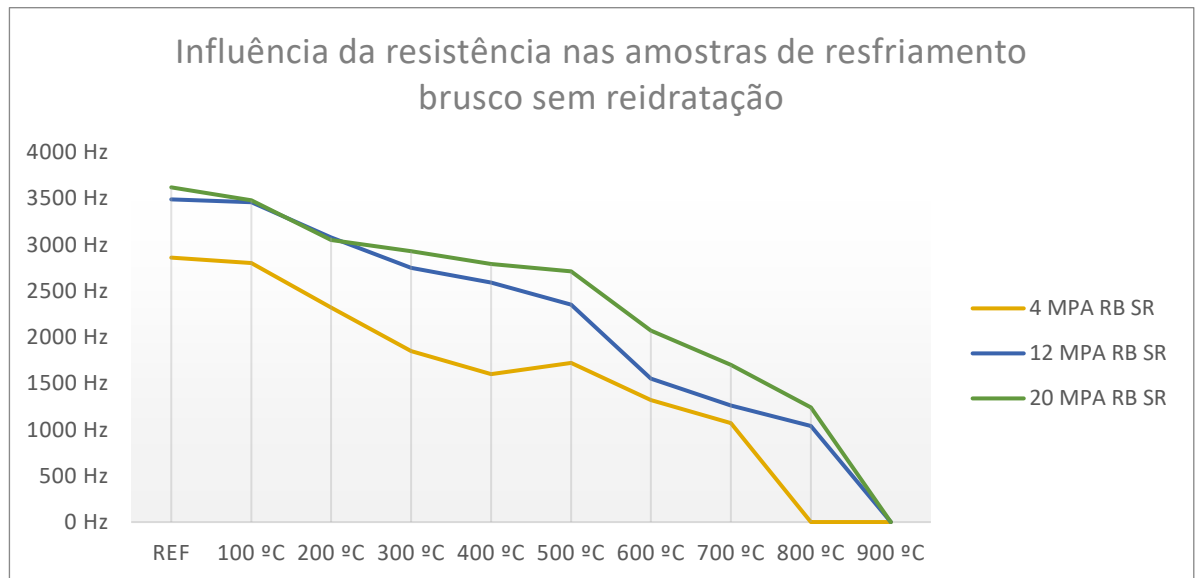
Figura 34. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento lento sem reidratação



Fonte: Autor

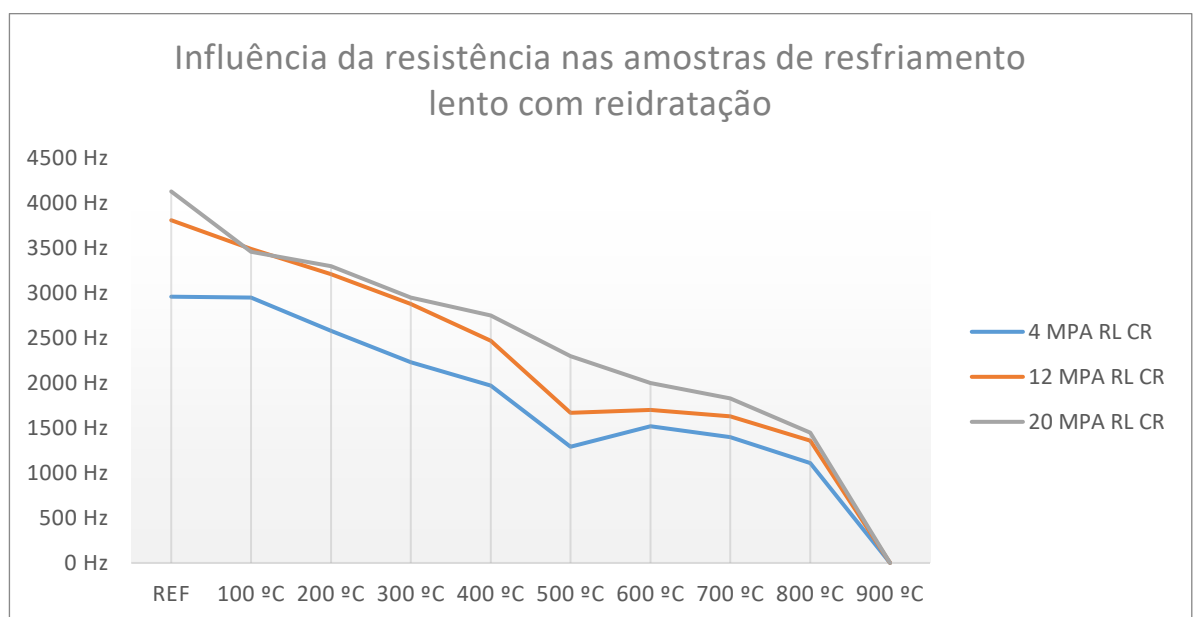


Figura 35. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento brusco sem reidratação



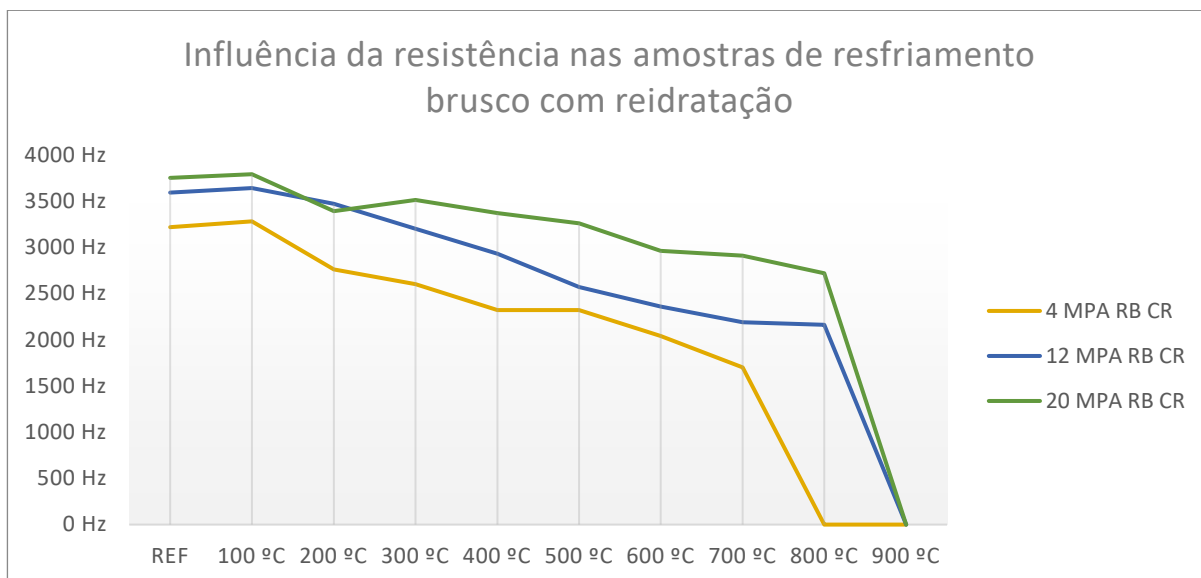
Fonte: Autor

Figura 36. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento lento com reidratação



Fonte: Autor

Figura 37. Comparação das frequências naturais transversais por resistência nominal das amostras submetidas a resfriamento brusco com reidratação



Fonte: Autor

Considerando a correlação entre frequência natural de vibração e os módulos elásticos percebe-se uma clara influência positiva da resistência na coesão e integridade das amostras quando submetidas a faixas de temperatura mais elevadas, principalmente na faixa de 800° C onde foi possível a realização do ensaio das amostras de 12 MPa e 20 MPa, ao contrário das amostras de 4 MPa.

#### 4.5 REIDRATAÇÃO

As amostras reidratadas apresentaram um aumento na frequência natural transversal de vibração, com exceção das amostras de 20 MPa submetidas ao resfriamento lento que apresentaram queda.

Nas amostras de 4 MPa, 12 MPa e 20 MPa submetidas ao resfriamento lento, a reidratação não contribuiu para uma alteração significativo no valor, como pode-se observar nas Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 15. Variação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 4 MPa após o período de reidratação

4 MPa	RL	RB
	CR/SR	CR/SR
REF	1,03	1,13
100 °C	1,03	1,17
200 °C	1,07	1,19
300 °C	1,02	1,41
400 °C	1,08	1,45
500 °C	1,00	1,35
600 °C	1,11	1,55
700 °C	1,17	1,59
800 °C	1,23	
900 °C		
Média	1,08	1,35

Fonte: Autor

Tabela 16. Variação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 12 MPa após o período de reidratação

12 MPa	RL	RB
	CR/SR	CR/SR
REF	1,01	1,03
100 °C	1,03	1,05
200 °C	1,04	1,13
300 °C	1,06	1,16
400 °C	1,06	1,13
500 °C	1,02	1,09
600 °C	1,09	1,52
700 °C	1,10	1,74
800 °C	1,08	2,08
900 °C		
Média	1,05	1,33

Fonte: Autor

Tabela 17. Variação da frequência natural transversal de vibração das amostras de 20 MPa após o período de reidratação

20 MPa	RL	RB
	CR/SR	CR/SR
REF	1,00	1,04
100 °C	1,01	1,09
200 °C	1,00	1,11
300 °C	0,98	1,20
400 °C	1,02	1,21
500 °C	0,94	1,20
600 °C	0,95	1,43
700 °C	0,96	1,71
800 °C	0,88	2,19
900 °C		
Média	0,97	1,35

Fonte: Autor

A reidratação teve maior impacto nas amostras submetidas ao resfriamento brusco. Para todas as resistências houve um aumento médio de 34,3% do valor da frequência natural transversal de vibração como pode-se observar na Tabela 18.

Tabela 18. Variação da frequência natural transversal de vibração de todas as amostras após o período de reidratação

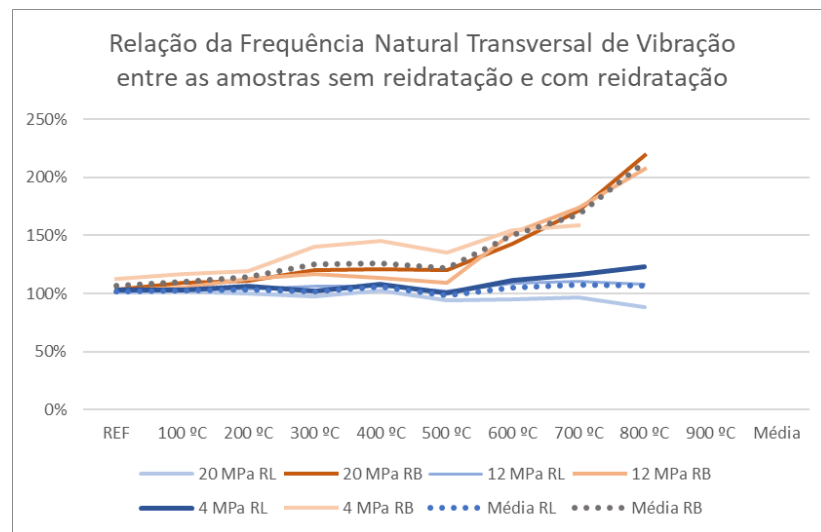
Média	RL	RB
	CR/SR	CR/SR
REF	1,01	1,06
100 °C	1,02	1,10
200 °C	1,03	1,14
300 °C	1,02	1,26
400 °C	1,05	1,26
500 °C	0,99	1,22
600 °C	1,05	1,50
700 °C	1,08	1,68
800 °C	1,07	2,14
900 °C		
Média	1,04	1,34

Fonte: Autor

Destacam-se entre as amostras de 12MPa e 20MPa as submetidas a temperaturas de aquecimento acima de 700° C e resfriamento brusco que apresentaram valores de frequência natural transversal de vibração entre 174% e 219% do valor sem reidratação como pode ser observado nas tabelas 16 e 17.

As linhas pontilhadas da figura 38 demonstram a tendência média da variação dos valores de frequência natural transversal de vibração das amostras dependendo do método de resfriamento a que foram submetidas.

Figura 38. Variação da frequência natural transversal de vibração após o período de reidratação



Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi analisar a influência de quatro fatores – temperatura de aquecimento, reidratação, resistência e método de resfriamento – no valor da frequência natural transversal de vibração de amostras retangulares moldadas com argamassas de assentamento estrutural. Para isso foram utilizadas as instruções da norma americana ASTM C215 que define os parâmetros para o ensaio das frequências naturais de amostras de concreto. Definiu-se um sistema em condição livre-livre que foi montado dentro de uma câmara acústica no laboratório de acústica da UFSM, a fim de minimizar qualquer interferência externa.

Foi possível observar uma tendência de queda nos valores da frequência natural transversal de vibração conforme há o aumento da temperatura de aquecimento. As maiores quedas foram observadas nas temperaturas acima de 700° C com grande parte das amostras apresentando um valor residual igual a zero quando aquecidas a 900° C. Observou-se, também, uma queda significativa na média de 10% na transição entre os 100° C-200° C e 400° C-500° C. Observou-se, em média, uma queda de 8% do valor de referência para cada 100° C de aumento na temperatura de aquecimento.

Para os métodos de resfriamento, observou-se um comportamento inverso entre as amostras sem reidratação e as amostras com reidratação. As amostras sem reidratação, submetidas ao resfriamento lento, apresentaram valores de frequência natural transversal de vibração levemente maiores em relação às submetidas ao resfriamento brusco, com uma diferença significativa para as temperaturas de aquecimento acima de 700° C. As amostras reidratadas apresentaram um comportamento contrário. Quando submetidas ao resfriamento lento tiveram valores de frequência natural transversal de vibração menores, na média de 82% dos valores das amostras submetidas ao resfriamento brusco e novamente houve uma diferença significativa nas faixas de aquecimento mais altas, chegando a 58% do valor. Foi observada uma variação na influência do método de resfriamento entre as amostras de diferentes resistências. As amostras de 4 MPa apresentaram menor variação nos valores em relação as amostras de 12 MPa e 20 MPa.

Destaca-se uma correlação entre a resistência e os valores da frequência natural transversal de vibração. As amostras de 4 MPa apresentaram os menores valores enquanto as de 20 MPa apresentaram os maiores valores. Foi observado um aumento significativo entre as amostras de 4 MPa para as de 12 MPa e um aumento menor entre as de 12 MPa e 20 MPa. Ressalta-se que as amostras de 12 MPa e 20 MPa que mantiveram a integridade na faixa de

temperatura de 800°C mesmo após o período de reidratação enquanto as de 4 MPa não puderam ser ensaiadas.

Por fim, a reidratação impactou para o aumento do valor da frequência de vibração na maioria das amostras ensaiadas, com um aumento significativo dos valores de frequência natural transversal de vibração nas amostras submetidas ao resfriamento brusco. A influência da reidratação aumentou conforme houve o aumento na temperatura de aquecimento. Destaca-se a influência da reidratação nas amostras submetidas ao resfriamento brusco e as faixas de aquecimento acima de 600° C onde os valores, após o período de reidratação, apresentaram um aumento de até 114%.

Através da observação dos resultados de todas as amostras ensaiadas, é interessante ressaltar as diversas interações entre os fatores analisados. As amostras moldadas com a argamassa estrutural de resistência nominal de 20 MPa, submetidas ao resfriamento brusco e após o período de reidratação, apresentaram os maiores valores de frequência natural transversal de vibração, enquanto as amostras de 4 MPa submetidas ao resfriamento brusco sem reidratação apresentaram os menores valores.

Enquanto resistência, temperatura e reidratação tiveram uma influência clara nos valores de frequência natural transversal de vibração, o método de resfriamento foi o único fator que apresentou um comportamento variável dependendo da resistência, temperatura e reidratação das amostras.

Os resultados obtidos através dos ensaios foram suficientes para avaliar a influência de cada um dos fatores na frequência natural transversal de vibração. O estudo de diversos fatores simultaneamente proporcionou uma melhor avaliação da influência, além de levantar questionamentos que devem servir como base para futuras pesquisas.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para trabalhos futuros, o estudo do impacto do método de resfriamento brusco na microestrutura das amostras de argamassa estrutural. A correlação entre a frequência natural transversal com o módulo de elasticidade e consequentemente a resistência. O uso da frequência natural transversal de vibração para identificação do módulo de elasticidade dinâmico e sua comparação com o método que utiliza o ultrassom.

## 6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. T. DE. **Vibrações mecânicas para engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: [s.n.].
- ASTM. **C215-14 Standart Teste Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens**. 2014
- BOLINA, C. C. et al. **Vibrações: As Frequências Naturais Estimada E Experimental De Uma Estrutura**Goiás, 2014.
- BONNELL, D. G. R.; HARPER, F. C. **The thermal expansion of concrete**LondonHMSO, , 1951.
- BORGES, A. S. [UNESP]. Análise modal baseada apenas na resposta: decomposição no domínio da frequência. **Aleph**, p. xv, 104 f. : il., 2006.
- BRÜEL; KJAER. **Structural testing part 2 - modal analysis and simulation**, 1988.
- CARVALHO, E. F. T. **Contribuição ao estudo da resistência residual do concreto submetido ao tratamento térmico padrão para situações de incêndio**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.
- COSSOLINO, L.; PEREIRA, A. Amortecimento: classificação e métodos de determinação. Informativo Técnico-Científico ITC04 - Amortecimento/ATCP. **ATCP Engenharia Física**, p. 14, 2010.
- CRUZ, S. L. M. DA. **Estudo de técnicas de análise modal operacional em sistemas sujeitos a excitações aleatórias com presença de componente harmônico**ParáUFPA, , 2006.
- DESFORGES, M.; COOPER, J.; WRIGHT, J. Spectral and modal parameter estimation from output-only measurements. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 9, n. 2, p. 169–186, 1995.
- DIÓGENES, H. J. F. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v. 4, n. 5, p. 803–813, 2011.
- DOVEL, G. **Modal analysis: A dynamic tool for design and troubleshooting**, 1989.
- EWINS, D. J. **Modal testing: Theory and Practice**. [s.l.] John Wiley & Sons Inc., 1984.
- EWINS, D. J. **Modal testing: theory, practice and application**Reserch Studies Press, , 2000.
- GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete: a case study. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 255–259, 2005.
- HARMATHY, T. Z. **Behavior of concrete under temperature**



**extremes**DetroitAmerican Concrete Institute, , 1973.

HE, J.; FU, Z.-F. **Modal Analysis**Butterworth-Heinemann, , 2001.

LEES, T. P. **Durability of concrete structures: investigation, repair, protection**LondonE & FN Spon, , 1992.

LEME, L. M. M. **Estudo Comparativo de Técnicas de Análise Modal Experimental no Domínio da Frequência em uma Barra na Condição de Contorno Livre-Livre**Pato BrancoUTFPR, , 2014.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. [s.l.] Elsevier Science, 2005.

MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. **Theoretical and experimental modal analysis**SomersetReserch Studeis Press, , 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MOHAMEDBHAI, G. T. G. Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete. **Magazine of Concrete Research**, p. 151–158, 1986.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEWLAND, D. E. **An introduction to random vibrations and spectral analysis**John Wiley & Sons, , 1984.

NUNES, P. M. **Desenvolvimento De Métodos De Identificação De Parâmetros Modais Operacionais Usando O Método De Subespaço**CuritibaUFPR, , 2015.

OLIVEIRA, T. A. **ANÁLISE MODAL DE ESTRUTURAS: ABORDAGEM NUMÉRICA E**Santa Maria, 2015.

PATRICK, G. B. Practicalities of acquiring valid data during modal tests. v. 2, n. *Sound Vib.*, p. 845–849, 1985.

PETRUCCI, E. G. **Concreto de cimento portland**. Porto Alegre: Editora Globo, 1973.

RAMSEY, K. A. Effective measurements for structural dynamics testings. p. 14, 1976.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4<sup>a</sup> Edição ed. São Paulo: [s.n.].

REGINA, A. Análise De Vibração De Vigas E Colunas Considerando a Interação Entre O Solo E a Estrutura. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia - RIPE**, v. 2, n. 2, p. 225–236, 2016.

SALGADO, J. M. **Análise Modal Experimental Aplicada a Um Componente Estrutural Automóvel**. [s.l.] Universidade do Minho, 2012.

SARSHAR, R.; KHOURY, G. A. Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures. **Maganize of Concrete Research**, v. 45, n. 162, p. 51–61, 1993.

SCHWARZ, B. J.; RICHARDSON, M. H. **Experimental Modal Analysis** Jamestown, California Vibrant Technology, Inc., , 1999.

SHOAIB, M. M.; AHMED, S. A.; BALAHA, M. M. **Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars** Cement and Concrete Research, , 2001.

SILVA, S. DA. **Vibrações Mecânicas - Notas de Aulas** Foz do Iguaçu, 2009.

SOEIRO, N. S. (UFPA). **Análise Modal Experimental** Universidade Federal do Pará, 2001. Disponível em: <[http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgT\\_QAK/analise-modal-experimental?part=2#](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgT_QAK/analise-modal-experimental?part=2#)>

SONELASTIC. **Módulos Elásticos.** Disponível em: <<https://www.sonelastic.com/pt/fundamentos/bases/modulos-elasticos.html>> Acesso em: 21 nov. 2021.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR, A. L. Efeitos de altas temperaturas na resistência à compressão, à tração e módulo de deformação do concreto. **Revista IBRACON**, v. 3, n. 4, p. 432–448, set. 2010.

STROUD, R. C. Excitacion, measurement and analysis methods for modal testing. **Sound and Vibration**, p. 12–27, ago. 1987.

SURE SOEIRO, N. **Curso De Fundamentos De Vibrações E Balanceamento De Rotores** Belém UFBA, , 2008.

YÜSER, N.; AKÖZ, F.; ÖZTÜRK, L. D. **Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature.** Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science>>. Acesso em: 27 mar. 2021.