



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

**AVALIAÇÃO DO ESTADO DE FISSURAÇÃO DE LAJES  
CONVENCIONAIS UTILIZANDO TESTES MODAIS**

*Por*

***Tulio de Oliveira Guedes***

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

## **AVALIAÇÃO DO ESTADO DE FISSURAÇÃO DE LAJES CONVENCIONAIS UTILIZANDO TESTES MODAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Tulio de Oliveira Guedes**

**Orientador: Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel**

G924a Guedes, Tulio de Oliveira.

Avaliação do estado de fissuração de lajes  
convencionais utilizando testes modais. / Tulio de  
Oliveira Guedes. - João Pessoa, 2018.  
134f. : il.

Orientação: Roberto Pimentel.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/Tecnologia.

1. Teste modal. 2. Detecção de dano. 3. Laje maciça. 4. Laje  
nervurada. 5. Frequência natural. I. Pimentel, Roberto. II. Título.

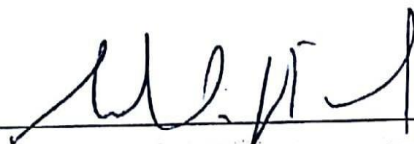
UFPB/BC


**TULIO DE OLIVEIRA GUEDES**


**AVALIAÇÃO DO ESTADO DE FISSURAÇÃO DE LAJES  
CONVENCIONAIS UTILIZANDO TESTES MODAIS**

Dissertação aprovada em 26/09/2016 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel – UFPB  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Jacomel Torii – UFPB  
(Examinador Interno)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Luís Vital de Brito – UnB  
(Examinador Externo)

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e saúde para estudar.

Agradeço aqui a todos que de alguma forma participaram desta dissertação, desde os que a acompanharam comigo aos que sempre me desejaram sorte e bênçãos na minha vida e estudos.

Ao Professor Roberto Leal Pimentel pela cobrança durante este mestrado. Pelo compartilhamento de todo seu conhecimento e experiência, pela compreensão quando acabei me envolvendo em um vínculo empregatício e finalmente pela grande oportunidade de tê-lo como orientador desta dissertação de mestrado.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.

A todos os professores, funcionários e alunos que fazem parte do LABEME (Laboratório de Estrutura e Materiais) da UFPB pela troca de conhecimentos e disponibilização de equipamentos e materiais.

Aos colegas que me auxiliaram no desenvolvimento do trabalho, tanto nos experimentos, quanto no processamento dos dados: Gabriel, Lucas e Márcio.

Aos colegas e amigos da turma do mestrado, em especial aqueles que mais conviveram comigo durante as atividades do curso e sofreram juntos no estudo das disciplinas de estruturas: José Diego e Guilherme Urquiza.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos no primeiro ano do mestrado.

A todos os meus familiares e amigos que sempre incentivaram meus estudos, incluindo meus irmãos, Ítalo e Júlia, e minha namorada, Gabriela.

Aos meus pais (Edelson e Jeane), presentes sempre na minha vida e educação, sempre me apoiando e incentivando.

## RESUMO

O estudo do comportamento dinâmico das estruturas surge como alternativa para averiguar seu comportamento estrutural. Este trabalho tem como objetivo investigar se testes modais são eficazes na avaliação do estado de fissuração associado à capacidade de carga de lajes convencionais de concreto armado (maciça e nervurada). Quatro lajes convencionais (duas maciças e duas nervuradas) foram testadas através de testes estáticos e dinâmicos, e tiveram seus resultados estudados. Todas as lajes possuem largura e comprimento de 3,00m x 1,35m. A espessura das lajes maciças é de 0,08m e a das lajes nervuradas de 0,26m. Para apoiar as lajes foram utilizados perfis metálicos fixados em blocos de concreto, tais apoios simularam a situação isostática, sendo um de primeiro gênero e outro segundo gênero. Todas as quatro lajes foram submetidas a ciclos de carga e descarga com suas deflexões medidas e os testes modais eram realizados ao fim de cada ciclo. Inicialmente, testes estáticos foram nas lajes maciças, e nele puderam-se medir as deflexões sofridas pelas lajes em cada estágio de carga. Foi observado que durante a aplicação da carga de 16 kN as lajes saíram de seu regime elástico e suas curvas de deflexão mudaram bruscamente de inclinação. Após a aplicação de cada estágio de carga procedeu-se com os testes modais. Os resultados dos parâmetros modais para as lajes maciças foram obtidos tanto pelo método do decaimento em vibração livre como através do software StarModal. Tais resultados mostraram-se em conformidade com a gradual perda de rigidez das lajes ao longo da aplicação dos ciclos de carga e descarga, uma vez que as frequências naturais foram diminuindo. Foi aplicado o índice de dano que se baseia na variação das frequências naturais. Os resultados deste mostraram que apenas após o estágio de 8kN a laje sofre um dano que pode ser reparado, e este nível de dano também foi observado pelas fissuras encontradas durante os testes. Para as lajes maciças foi feita uma análise baseada na inclinação das curvas da frequência natural ao longo do decaimento e notou-se que o coeficiente angular da reta ajustada às curvas cresce à medida que diminui a rigidez para o caso testado. Os testes estáticos foram feitos também para as lajes nervuradas, entretanto, estas apresentaram deslocamentos lineares muito pequenos quando submetidas às cargas aplicadas, isto devido à elevada rigidez das mesmas. Apenas após o estágio de 28kN algumas curvas de deflexão mostraram a mudança brusca de inclinação que representou a saída do regime linear. Os testes modais foram realizados nas lajes nervuradas de forma semelhante ao realizado para as lajes maciças. Não foi observada significativa queda de frequência e o índice de detecção de dano não apresentou nenhum dano que não pudesse ser reparado, tudo isso devido à elevada rigidez da laje. Por fim, concluiu-se que os testes modais se mostraram como uma alternativa promissora a ser estudada para detecção de danos estruturais, principalmente devido aos resultados obtidos para as lajes maciças.

**PALAVRAS-CHAVE:** Teste modal, detecção de dano, laje maciça, laje nervurada, frequência natural.

## ABSTRACT

The study of the dynamic behavior of structures is an alternative to investigate its structural behavior. This study aims to investigate whether modal tests are effective in assessing the state of cracking associated with the load capacity of conventional reinforced concrete slabs (solid and ribbed). Four conventional slabs (two solid and two ribbed) were tested using static and dynamic tests, and had their results studied. All slabs have width and length of 3,00m x 1,35m . The thickness of solid slabs is 0.08 m and the ribbed slabs of 0,26m. To support the slabs were used metal profiles set in concrete blocks, such support simulated isostatic situation, being one pin and one roller support. All four slabs were subjected to charge and discharge cycles with their deflections measured and modal tests were made at the end of each cycle. Firstly, static tests were in solid slabs, it could be measured deflections experienced by the slabs in each load stage. It was observed that during the application of 16 kN load the slabs left their elastic regime and its deflection curves abruptly changed slope. After application of each load stage, it was proceeded with modal tests. The results of the modal parameters for the solid slabs were obtained by decay method for free vibration and through StarModal software. These results were in accordance with the gradual loss of rigidity of the slabs during implementation of charge and discharge cycles, because the natural frequencies were falling. A damage index based on natural frequencies variation was applied. The results showed that only after 8kN stage the slab suffers damage that can be repaired, which was also shown by cracks found during testing. For solid slabs, it was made a slope based analysis of the natural frequency along the decay curves and it was noted that the slope of the fitted straight curves increases as decreases the stiffness of the tested case. Static tests were also made for the ribbed slabs, however, they showed very small linear displacement when subjected to applied loads because of their high stiffness. Only after 28kN stage some deflection curves showed the abrupt change in slope, representing the output of the linear regime. The modal tests were performed in ribbed slabs similarly to that performed for solid slabs. There was no high frequency loss and damage detection rate did not show any damage that could not be repaired, all due to the high rigidity of the slab. Finally, it was concluded that the modal tests have shown a promising alternative to be studied for detection of structural damage, mainly due to the results obtained for solid slabs.

**KEYWORDS:** Modal testing, damage detection, solid slabs, ripped slabs, natural frequency.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT .....	6
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	13
1. INTRODUÇÃO .....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	19
2.1. TESTES MODAIS .....	19
2.1.1. <i>Fixação da Estrutura</i> .....	20
2.1.2. <i>Excitação da Estrutura</i> .....	20
2.1.3. <i>Processamento dos dados</i> .....	21
2.1.3.1. Conceito de FRF .....	21
2.1.4. <i>Obtenção dos parâmetros modais</i> .....	22
2.2. RELAÇÃO ENTRE DANO/FISSURAÇÃO E OS PARÂMETROS MODAIS.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
3.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	27
3.1.1. <i>Célula de carga</i> .....	27
3.1.2. <i>LVDTs (Linear Variable Differential Transformer)</i> .....	27
3.1.3. <i>Martelo de impacto</i> .....	28
3.1.4. <i>Acelerômetro</i> .....	29
3.1.5. <i>Condicionador de sinais</i> .....	31
3.1.6. <i>Analizador de espectros</i> .....	31
3.2. ESTRUTURAS TESTADAS.....	32
3.2.1. <i>Lajes Maciças</i> .....	32
3.2.1.1. Confecção das lajes maciças .....	32
3.2.1.2. Testes estáticos e dinâmicos das lajes maciças .....	36
3.2.1.3. Processamento de dados das lajes maciças.....	44
3.2.2. <i>Lajes Nervuradas</i> .....	44
3.2.2.1. Confecção das lajes nervuradas .....	45
3.2.2.2. Testes estáticos e dinâmicos das lajes nervuradas .....	49
3.2.2.3. Processamento de dados das lajes nervuradas.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
4.1. TESTES ESTÁTICOS NAS LAJES MACIÇAS .....	54
4.2. TESTES ESTÁTICOS NAS LAJES NERVURADAS.....	58
4.3. TESTES DINÂMICOS NAS LAJES MACIÇAS.....	61



4.3.1.	<i>Testes de Linearidade e Reciprocidade .....</i>	61
4.3.2.	<i>Parâmetros modais pelo método do decaimento.....</i>	69
4.3.3.	<i>Parâmetros modais utilizando-se o StarModal.....</i>	78
4.3.4.	<i>Aplicação do MAC para verificação dos modos das lajes maciças.....</i>	84
4.3.5.	<i>Aplicação de índice de detecção de dano .....</i>	86
4.3.6.	<i>Frequência x Número de ciclos do sinal filtrado .....</i>	89
4.3.7.	<i>Tempo de trânsito .....</i>	92
4.4.	<b>TESTES DINÂMICOS NAS LAJES NERVURADAS.....</b>	94
4.4.1.	<i>Testes de Linearidade e Reciprocidade .....</i>	94
4.4.2.	<i>Parâmetros modais pelo método do decaimento.....</i>	102
4.4.1.	<i>Parâmetros modais utilizando-se o StarModal.....</i>	108
4.4.2.	<i>Aplicação de índice de detecção de dano .....</i>	115
4.4.3.	<i>Tempo de trânsito .....</i>	118
5.	<b>CONCLUSÃO.....</b>	122
6.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	124
	<b>ANEXO A – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES MACIÇAS.....</b>	127
	<b>ANEXO B – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES NERVURADAS.....</b>	131

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de célula de carga. (Fonte: Google Imagens).....	27
Figura 2 – Modelo de LVDT semelhante ao utilizado nos ensaios. (Fonte: Google Imagens) ...	28
Figura 3 - Vista em corte de um LVDT. A corrente é aplicada na bobina primária A, fazendo com que uma tensão seja induzida em cada bobina secundária B. (Fonte: Wikipédia).....	28
Figura 4 – Martelo instrumentado do tipo 8208 da Brüel&Kjaer. (Fonte: Folheto do produto).29	
Figura 5 – Acelerômetro piezoelétrico. (KELLY, 2012) .....	30
Figura 6 – Esquema do transdutor piezoelétrico (KELLY, 2012).....	30
Figura 7 – Acelerômetro utilizado nos testes (Fonte: Arquivo pessoal).....	31
Figura 8 – Condicionador de sinais (Fonte: Arquivo pessoal) .....	31
Figura 9 - Analisador de espectro utilizado nos ensaios. Fonte: Folheto do produto (DataPhysics, 2015) .....	32
Figura 10 - Forma da laje maciça com a grelha, espaçadores e ganchos já posicionados .....	33
Figura 11 - Modelo CAD de representação da armadura da laje maciça 1 .....	34
Figura 12 – Distribuição normal para obtenção do fck do concreto utilizado nas lajes maciças.35	
Figura 13 - Nós preliminares das lajes .....	37
Figura 14 - Laje maciça sobre os apoios após ter sido içada com auxílio de cabos de aço. ....	38
Figura 15 - Detalhe dos apoios da laje sendo (a) apoio frontal e (b) apoio do fundo .....	39
Figura 16 - Esquema isostático da laje maciça - sendo o apoio de fundo do primeiro gênero e o frontal do segundo gênero. ....	39
Figura 17 – Posição final dos nós com sua devida numeração.....	40
Figura 18 - Sistema de aplicação de carga na laje. ....	41
Figura 19 - Posicionamento dos LVDT's da laje maciça 1 .....	42
Figura 20 – Laje nervurada moldadas com caixotes plásticos. (Fonte: Google Imagens).....	45
Figura 21 - Forma da laje nervurada com a grelha, espaçadores e ganchos já posicionados. ....	46
Figura 22 - Distribuição normal para obtenção do fck do concreto utilizado nas lajes nervuradas. ....	48
Figura 23 – Cura das lajes nervuradas e de seus corpos de prova.....	49
Figura 24 – Apoio do fundo da laje nervurada.....	50
Figura 25 - Sistema de aplicação de carga na laje nervurada 1. ....	51
Figura 26 - Posicionamento dos LVDT's da laje nervurada 1 .....	51
Figura 27 – Teste modal na laje nervurada 1 .....	52
Figura 28 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje maciça 1.....	54
Figura 29 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje maciça 1.....	55
Figura 30 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje maciça 1.....	55
Figura 31- Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje maciça 2.....	56
Figura 32 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje maciça 2.....	56
Figura 33- Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje maciça 2.....	57
Figura 34 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje nervurada 1 .....	58
Figura 35 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje nervurada 1 .....	59
Figura 36 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje nervurada 2 .....	59
Figura 37 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje nervurada 2 .....	60
Figura 38 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje nervurada 2 .....	60
Figura 39 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje nervurada 2 .....	61
Figura 40 - Espectro do ponto de referência (ponto12) na laje maciça 1. ....	70

Figura 41 - Sinal no domínio do tempo do ponto de referência (ponto 12) após filtragem para isolar o primeiro modo de vibração.....	71
Figura 42 – Variação do amortecimento obtido pelo decaimento com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga.....	77
Figura 43 – Variação da frequência obtida pelo decaimento com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga. ....	77
Figura 44 – Espectro no StarModal da laje maciça 1 para a carga de 22 KN.....	78
Figura 45 – Primeiro modo de vibração de laje maciça 1 – 0KN.....	79
Figura 46 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga.....	83
Figura 47 - Variação da frequência obtida pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga. ....	83
Figura 48 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 2 em cada estágio de carga.....	84
Figura 49 - Variação da frequência obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 2 em cada estágio de carga. ....	84
Figura 50 – Fissuras (em preto) surgidas após a aplicação da carga de 8KN. Foto da laje vista de baixo.....	88
Figura 51 - Fissuras (em vermelho) surgidas após a aplicação da carga de 16KN. Foto da laje vista de baixo.....	88
Figura 52 - Fissuras (em verde) surgidas após a aplicação da carga de 22KN. Foto da laje vista de baixo. ....	89
Figura 53 – Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 1 .....	90
Figura 54 - Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 2 .....	90
Figura 55 – Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 1 (martelada intensa).....	91
Figura 56 - Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 2 (martelada intensa).....	91
Figura 57 – Gráfico do índice de Kim et al. (2005) x Coeficientes angulares obtidos através das curvas de frequência ao longo do decaimento.....	92
Figura 58 – Variação do tempo de trânsito com a carga aplicada na laje maciça 2. ....	94
Figura 59 – Reciprocidade entre excitação no ponto 32 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 32, para laje maciça 1 – 0kN .....	62
Figura 60 - Reciprocidade entre excitação no ponto 31 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 31, para laje maciça 1 – 16kN .....	63
Figura 61- Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje maciça 1 – 22kN .....	63
Figura 62 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje maciça 2 – 0kN .....	64
Figura 63 - Reciprocidade entre excitação no ponto 31 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 31, para laje maciça 2 – 8kN.....	64
Figura 64 - Reciprocidade entre excitação no ponto 32 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 32, para laje maciça 2 – 16kN .....	65
Figura 65 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje maciça 2 – 22kN .....	65

Figura 66 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 1 – 0kN.....	66
Figura 67 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 1 – 16kN.....	66
Figura 68 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 1 – 22kN.....	67
Figura 69 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 0kN.....	67
Figura 70 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 8kN.....	68
Figura 71 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 16kN.....	68
Figura 72 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 22kN.....	69
Figura 73 - Variação do amortecimento obtido pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga. ....	106
Figura 74 - Variação da frequência obtida pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga. ....	107
Figura 75 - Variação do amortecimento obtido pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga. ....	107
Figura 76 - Variação da frequência obtida pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga. ....	108
Figura 77 - Espectro no StarModal da laje nervurada 1 para a carga de 0 kN.....	108
Figura 78 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga. ....	113
Figura 79 - Variação da frequência obtida pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga. ....	113
Figura 80 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga. ....	114
Figura 81 - Variação da frequência obtida pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga. ....	114
Figura 82 - Fissura (em verde) surgida após a aplicação da carga de 8kN – LN1. Foto da laje vista de baixo.....	116
Figura 83 - Fissura (em azul) surgida após a aplicação da carga de 16kN – LN1. Foto da laje vista de baixo.....	117
Figura 84 - Fissuras (em preto) surgidas após a aplicação da carga de 2kKN – LN1. Foto da laje vista de baixo.....	117
Figura 85 - Fissuras (em vermelho) surgidas após a aplicação da carga de 28KN – LN1. Foto da laje vista de baixo.....	118
Figura 86 - Variação do tempo de trânsito com a carga aplicada nas lajes nervuradas .....	121
Figura 87 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje nervurada 1 – 0kN.....	95
Figura 88 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje nervurada 1 – 28kN.....	96
Figura 89 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23 e excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 0kN.....	96

Figura 90 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23 e excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 8kN.....	97
Figura 91 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 31 e excitação no ponto 31 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 16kN.....	97
Figura 92 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 32 e excitação no ponto 32 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 22kN.....	98
Figura 93 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23 e excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 28kN.....	98
Figura 94 - Linearidade entre excitação no ponto 34 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 1 – 0kN.....	99
Figura 95 - Linearidade entre excitação no ponto 29 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 1 – 28kN.....	99
Figura 96 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 0kN.....	100
Figura 97 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 8kN.....	100
Figura 98 - Linearidade entre excitação no ponto 18 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 16kN.....	101
Figura 99 - Linearidade entre excitação no ponto 18 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 22kN.....	101
Figura 100 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 28kN.....	102
Figura 101 – Laje armada em uma direção .....	127
Figura 102 - Carregamento distribuído na laje maciça.....	128
Figura 103 – Detalhe da laje nervurada em corte .....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação entre o índice de dano e o estado da estrutura (KIM et al. 2005).....	26
Tabela 2 – Resistências à compressão dos corpos de prova do concreto utilizado nas lajes maciças.....	35
Tabela 3 - Resistências à compressão dos corpos de prova do concreto utilizado nas lajes nervuradas.....	47
Tabela 4 – Primeiro modo da laje maciça 1 com 0 kN.....	72
Tabela 5– Segundo modo da laje maciça 1 com 0 kN.....	72
Tabela 6 – Primeiro modo da laje maciça 1 com 16 kN.....	72
Tabela 7 – Segundo modo da laje maciça 1 com 16 kN.....	73
Tabela 8 – Terceiro modo da laje maciça 1 com 16 kN.....	73
Tabela 9 – Quarto modo da laje maciça 1 com 16 kN.....	73
Tabela 10 – Primeiro modo da laje maciça 1 com 22 kN.....	74
Tabela 11 - Segundo modo da laje maciça 1 com 22 kN.....	74
Tabela 12 – Terceiro modo da laje maciça 1 com 22kN.....	75
Tabela 13 – Quarto modo da laje maciça 1 com 22kN.....	75
Tabela 14 – Primeiro modo da laje maciça 2 com 0K.....	75
Tabela 15 – Primeiro modo da laje maciça 2 com 8KN.....	76
Tabela 16 – Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 1 – 0kN (laje sã).....	79
Tabela 17 – Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 1 – 16kN.....	80
Tabela 18 - Resultados obtidos do star modal para a laje maciça 1-22 kN.....	80
Tabela 19 – Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 0kN (laje sã).....	81
Tabela 20 - Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 8kN.....	81
Tabela 21 - Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 16kN.....	82
Tabela 22- Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 22kN.....	82
Tabela 23 – MAC entre os carregamentos para LM1 em seu primeiro modo de vibração.....	85
Tabela 24 – MAC entre os carregamentos para a LM2 em seu primeiro modo de vibração.....	85
Tabela 25 – MAC entre as Lajes para seu primeiro modo em cada carregamento.....	85
Tabela 26 – Aplicação do índice de detecção de dano para a laje maciça 1.....	86
Tabela 27 – Aplicação do índice de detecção de dano para a laje maciça 2.....	86
Tabela 28 - Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 0 kN.....	93
Tabela 29 – Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 8 kN.....	93
Tabela 30 – Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 16 kN.....	93
Tabela 31 – Tempo de trânsito medido por baixo na laje 2 com 16KN.....	93
Tabela 32 - Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 22 kN.....	93
Tabela 33 - Tempo de trânsito medido por baixo na laje 2 com 22 kN.....	94
Tabela 34 – Primeiro modo da laje nervurada 1 com 0kN.....	103
Tabela 35 – Segundo modo da laje nervurada 1 com 0kN.....	103
Tabela 36 – Primeiro modo da laje nervurada 1 com 16kN.....	103
Tabela 37 – Segundo modo da laje nervurada 1 com 16kN.....	104
Tabela 38 – Segundo modo da laje nervurada 1 com 28kN.....	104
Tabela 39 – Terceiro modo da laje nervurada 1 com 28kN.....	104
Tabela 40 – Primeiro modo da laje nervurada 2 com 0kN.....	105
Tabela 41 – Segundo modo da laje nervurada 2 com 0kN.....	105
Tabela 42 – Primeiro modo da laje nervurada 2 com 28kN.....	105
Tabela 43 – Segundo modo da laje nervurada 2 com 28kN.....	106

Tabela 44 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 0kN (Laje Sã) .....	109
Tabela 45 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 8kN.....	109
Tabela 46 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 16kN.....	109
Tabela 47 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 22kN.....	110
Tabela 48 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 28kN.....	110
Tabela 49 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 0kN (Laje sã).....	110
Tabela 50 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 8kN.....	111
Tabela 51 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 16kN.....	111
Tabela 52 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 28kN.....	112
Tabela 53 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 28kN.....	112
Tabela 54 - Aplicação do índice de detecção de dano para a laje nervurada 1.....	115
Tabela 55 - Aplicação do índice de detecção de dano para a laje nervurada 2.....	115
Tabela 56 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 0 kN.....	118
Tabela 57 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 8 kN.....	119
Tabela 58 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 16 kN .....	119
Tabela 59 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 22 kN .....	119
Tabela 60 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 28 kN .....	119
Tabela 61 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 0 kN.....	119
Tabela 62 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 8 kN.....	120
Tabela 63 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 16 kN .....	120
Tabela 64 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 22 kN .....	120
Tabela 65 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 28 kN .....	120

## 1. INTRODUÇÃO

As condições de uma estrutura são frequentemente analisadas em diversas fases de sua vida útil, seja na construção, posterior utilização ou reforço estrutural.

Com o passar dos anos o crescente desenvolvimento tecnológico permitiu o aperfeiçoamento da análise estrutural. Em contrapartida, diversos avanços em métodos construtivos, qualidade dos materiais e estruturas em geral fizeram com que a partir das décadas de 60 e 70 projetos mais ousados pudessem ser construídos com relativa facilidade, fazendo-se necessária a utilização de novas ferramentas experimentais que pudessem fornecer dados para análise estrutural. Nesse contexto, o estudo do comportamento dinâmico das estruturas surge como alternativa para averiguar seu comportamento estrutural.

É sabido que as estruturas atuais estão ficando antigas e deterioradas e que o monitoramento dessas estruturas visando a detecção de danos é de fundamental importância. Inspeções visuais ainda são frequentemente utilizadas para detectar tais danos, porém quando se trata de estruturas maiores e mais complexas, torna-se uma solução de eficácia limitada.

Uma das formas de se acompanhar o desempenho de estruturas ou obter determinadas propriedades é mediante o uso de testes e ensaios não destrutivos (do inglês Non-destructive Test - NDT), a exemplo do uso da esclerometria para obtenção da resistência superficial de materiais ou do ultrassom, aplicado na verificação da continuidade de peças estruturais. A ideia por trás de tais ensaios é que a estrutura a ser ensaiada sofra nenhum ou o mínimo de dano.

Para Curadelli et al. (2008), os ensaios não destrutivos mais difundidos requerem que a localização do dano seja conhecida a princípio e que seja acessível para inspeção e ensaio. Assim, técnicas de detecção de danos e fissuras baseados nos parâmetros modais das estruturas, obtidos de testes de vibração, são uma possibilidade a ser explorada.

Nesse contexto, teste modal é o termo utilizado para identificar ensaios que buscam a obtenção de propriedades dinâmicas das estruturas, tais como frequência natural, modos de vibração e razão de amortecimento. Pimentel et al. (2013) realizaram testes modais em uma laje de concreto pré-moldada convencional sob diversos estágios de fissuração e constatou uma queda nas frequências naturais em elevados estágios de fissuração, além de um aumento das frequências ao longo do decaimento em vibração



livre, o que são indicativos de que tais testes podem ser utilizados para identificação de danos em estruturas.

A utilização de testes modais em estruturas de engenharia civil possui várias finalidades e é largamente estudada pela comunidade científica. Martins et al.(2014) utilizaram os parâmetros modais para estudar a influência do vento e da temperatura na cobertura de um estádio de futebol na cidade de Braga em Portugal. Já Costa et al. (2014) avaliaram a mudança nas propriedades modais de uma ponte de aço antes e depois da execução de uma reabilitação estrutural.

No que diz respeito à análise de dano em uma estrutura por testes dinâmicos a literatura ainda é bastante controversa, pois ainda não são muitos os dados experimentais que fundamentem esse tipo de análise. Entretanto é uma investigação que vem crescendo gradativamente na engenharia estrutural. Hashim et al. (2013) utilizaram testes que fazem uso de excitações naturais como vento e tráfego para determinar os parâmetros modais de lajes de piso e constatou uma queda entre 25-53% nas frequências naturais de uma laje danificada quando comparada a uma não danificada. Em outro trabalho, Rucevskis et al. (2013) desenvolveram um algoritmo que usa a curvatura dos modos de vibração para localização de danos em placas. Curie et al. (2012) analisaram numericamente e experimentalmente uma placa de alumínio e observou que para os 5 ou 6 primeiros modos de vibração as frequências naturais foram obtidas com um nível de precisão bastante satisfatório, em contrapartida, estas se mostraram pouco sensíveis a identificação de danos. Ainda neste último trabalho também observou-se que a forma dos modos de vibração podem ser melhores indicadores de danos estruturais.

Comanducci et al. (2015) utilizaram a análise estatística multivariada, através de variações nas frequências naturais para monitorar o estado dos principais cabos de pontes estaiadas. Os resultados demonstram a viabilidade de sistemas de monitoramento contínuo para revelar a existência de danos em pontes de grandes vãos, excitadas pelo vento, que produzam variações relativas da frequência natural mais sensível menor que 0,1%.

Dworakowski et al. (2015) utilizaram a análise modal para localização de danos em placas. É sabido que os danos alteram os modos de vibração localmente devido à perda de rigidez, foi então criada uma malha em uma placa de aço que foi submetida a danos. O método proposto conseguiu localizar os danos, fornecer suas magnitudes e direções.

Rodriguez-Gomez e Cakmak (1990) propuseram um índice para avaliar danos em estruturas submetidas a terremotos, baseado em características dinâmicas dessas estruturas, no caso, mudanças no período fundamental.

Stone et al. (1993), Williams et al. (1997) e Park et al. (1987) foram alguns dos autores que estabeleceram limites para os índices de classificação das condições das estruturas avaliadas pelo índice proposto por Rodriguez-Gomez e Cakmak (1990).

Kim et al. (2005), por sua vez, utilizaram o índice proposto por Rodriguez- Gomez e Cakmak (1990) para avaliar o nível de danos causado na estrutura de uma ponte que foi danificada em consequência de um terremoto. O mesmo propôs uma Tabela que enquadra o estado de dano de estruturas conforme os limites estabelecidos por Stone et al. (1993), Williams et al. (1997) e Park et al. (1987).

No presente trabalho os parâmetros modais como frequência natural, modos de vibração e razão de amortecimento serão utilizados na investigação do estado de fissuração de lajes maciças e nervuradas convencionais. Uma mesma estrutura será submetida a diferentes estágios de fissuração induzidos por carregamento e posteriormente serão realizados os devidos ensaios dinâmicos.

Portanto, a pesquisa se insere num campo científico em crescimento e que tem a acrescentar no sentido de avaliar a qualidade das estruturas de engenharia civil, e, diante disso, o trabalho propõe investigar a variação das propriedades modais de lajes convencionais, de modo a averiguar se tais propriedades podem fornecer indicadores do estado de fissuração das mesmas.

### **Objetivo Geral:**

O trabalho tem como objetivo geral investigar se testes modais são eficazes na avaliação do estado de fissuração associado à capacidade de carga de lajes convencionais de concreto armado (maciça e nervurada). A variação nos parâmetros frequência natural, modos de vibração e razão de amortecimento serão utilizados como indicadores do nível de dano nas lajes. Tal avaliação visa contribuir para a utilização de testes dinâmicos para quantificar danos em uma estrutura de concreto armado.

### **Objetivos Específicos:**

- Analisar diferenças entre as lajes maciças e nervuradas na quantificação do dano diante dos parâmetros modais obtidos.

- Verificar a aplicabilidade de modelos existentes na literatura para quantificação de dano, ao caso em estudo.
- Desenvolver modelo empírico que descreva a variação dos parâmetros modais para cada tipo de laje e para variado nível de fissuração.
- Investigar o comportamento das frequências naturais e razões de amortecimento para diferentes níveis de fissuração em cada laje.
- Identificar limitações e possíveis desdobramentos do trabalho.

A dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma: neste primeiro capítulo (*Introdução*) relata-se uma contextualização abrangendo o tema em estudo, como também são estabelecidos os objetivos que se pretende alcançar com este trabalho. No capítulo 2 (*Referencial Teórico*) são apresentados conceitos a respeito do papel dos testes modais, os tipos de aquisição e processamento de dados existentes e a relação entre os parâmetros modais e o estágio de dano/fissuração nas estruturas. No Terceiro capítulo (*Materiais e Métodos*) estão descritas as etapas metodológicas utilizadas para atingir os objetivos propostos no capítulo 1. O capítulo 4 (*Resultados e Discussões*) constitui os resultados e discussões a respeito das análises nas lajes de acordo com os parâmetros modais obtidos para cada estágio de fissuração testado. No último capítulo (*Conclusões e Recomendações*) são apresentadas as considerações finais acerca dos resultados obtidos durante a pesquisa, evidenciando a importância da realização do trabalho e deixando algumas recomendações para estudos futuros. Por fim, foram listadas as referências que serviram de aporte para a elaboração da dissertação, e os apêndices resultantes desta pesquisa.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo está compartimentado em duas partes, de acordo com os elementos que foram empregados na metodologia da pesquisa para alcançar os resultados desejados. Na primeira parte foi realizada uma conceituação sobre testes modais, dando ênfase no tipo de teste e de processamento utilizados no trabalho. A segunda parte apresenta as formas de utilização dos parâmetros modais para identificar estágios de fissuração em diversas estruturas, e introduz também o procedimento que será utilizado para classificar as estruturas testadas nesta pesquisa.

### **2.1. TESTES MODAIS**

Ewins (1984) define testes modais como sendo procedimentos experimentais que possuem como objetivo principal a obtenção de uma descrição matemática do comportamento vibratório de um sistema. Ou seja, os testes modais são feitos visando a obtenção dos parâmetros dinâmicos da estrutura, frequência natural, modos de vibração e razão de amortecimento que por sua vez são utilizados para validar modelos numéricos ou analíticos da estrutura testada.

Testes modais são baseados em três principais pilares: uma base teórica consolidada sobre o assunto, uma correta análise dos dados medidos, além de um tratamento realístico e detalhado desses dados de forma mais adequada a cada caso.

Estes testes podem ser realizados em estruturas reais com fontes de excitação naturais como vento ou tráfego, ou podem ser excitadas de forma controlada, por uma carga medida. No caso de serem medidos tanto a excitação quanto a resposta obtida, assumindo comportamento elástico linear da estrutura dentro da faixa de excitação, é possível obter a função resposta em frequência (FRF) da estrutura testada. Sob carga de impacto, ainda é possível obter informações complementares através do decaimento em vibração livre da estrutura.

Existem diversas aplicações usuais para os quais os testes modais se fazem um recurso importante. Ewins explica que tais testes são comumente utilizados para validar modelos teóricos, para comparar resultados experimentais com algoritmos já consagrados, para determinar forças que causam vibrações em estruturas, entre outras aplicações.

Para correta análise modal experimental, as etapas a serem seguidas são: a fixação da estrutura, a excitação da estrutura, o processamento de dados e a obtenção dos parâmetros modais.

### **2.1.1. Fixação da Estrutura**

Segundo Ewins (1984), uma importante fase preliminar dos testes é a montagem da estrutura propriamente dita. Devem-se verificar as condições do apoio, para que a estrutura não vibre sobre os mesmos evitando que ruídos alheios às respostas venham a interferir nos resultados coletados.

Ewins explica ainda que a primeira decisão que tem de ser tomada é se a estrutura é para ser testada em uma condição “livre” ou “esgastada”. Por “livre” entende-se que o objeto testado não está ligado à terra em qualquer das suas coordenadas e é, com efeito, livremente suspenso no espaço. Caso o objetivo seja determinar a massa e as propriedades de inércia, testar uma estrutura nessa condição pode ser a alternativa utilizada. Obviamente na prática esta situação seria apenas hipotética, mas em um ambiente controlado utilizam-se situações aproximadas.

A outra condição de apoio é o engaste, que é considerada de simples modelagem, mas aplicação experimental difícil, pelo fato de ter que se utilizar um apoio suficientemente rígido que resulte num engastamento adequado.

No presente trabalho as estruturas testadas foram concebidas como simplesmente apoiadas, com livre rotação em ambos os apoios. Esta condição de apoio pode ser objeto de investigação futura, por correlação com resultados obtidos de modelagem da estrutura testada.

### **2.1.2. Excitação da Estrutura**

Os equipamentos mais comuns utilizados para excitação das estruturas em ambientes controlados são os “shakers” e os martelos instrumentados. Os shakers trabalham fixados à estrutura e deve-se garantir que estes excitem a estrutura na direção em que se deseja medir a resposta. Ewins (1984) enfatiza que a frequência e amplitude de excitação são controladas de forma independente uma da outra, dando maior flexibilidade operacional, o que o torna especialmente útil, pois é melhor para variar o nível de excitação à medida que a estrutura passa pelo nível de ressonância.

Outro equipamento bastante utilizado para obtenção dos parâmetros modais de estruturas em ambiente controlado é o martelo de impacto instrumentado. Este produz uma excitação transiente que é manualmente imposta. O equipamento é composto por nada mais que um martelo equipado de uma célula de carga, que medirá o impacto no martelo e assumirá que o impacto na estrutura é de mesma magnitude, porém com

sentido inverso. O martelo geralmente possui diversos tipos de pontas que devem ser modificadas de acordo com o tipo de estrutura a ser testada.

Uma estrutura excitada com um martelo de impacto estará sendo submetida à excitação em uma ampla faixa de frequência. Esta excitação faz com que a estrutura vibre em suas frequências naturais. O sistema de aquisição permite que seja medida a resposta de vibração da estrutura (através de um acelerômetro) e a força de impacto na entrada (medido através da compressão do sensor pela massa da cabeça do martelo e da velocidade que este atinge a estrutura). Obtem-se assim a função resposta em frequência (FRF), que identifica as frequências de ressonância (modos de vibração).

Neste trabalho foi utilizado o martelo de impacto, pelo fato dele ser ideal para excitar uma estrutura em vários pontos, o que consumiria um tempo considerável em caso de utilização do shaker. Além disso, é oportuno utilizar excitação que induza decaimento em vibração livre da estrutura, que é o caso da solicitação impactante, conforme será discutido mais adiante.

### **2.1.3. Processamento dos dados**

O processamento de dados pode ser feito com analisadores de espectro capazes de fornecer as características de resposta da estrutura no domínio do tempo e da frequência. Para isso utilizam-se técnicas que vão depender do tipo de função espectral obtida bem como do tipo de resultado que se deseja extrair.

#### **2.1.3.1. Conceito de FRF**

A Função de Resposta em Frequência (FRF) é uma matriz que relaciona a saída (resposta) de um sistema por cada unidade de entrada (excitação), aplicada como função da frequência de excitação. Os picos de FRF estão relacionados aos modos de vibração e indicam as frequências naturais. É a função de resposta obtida pelo sistema de aquisição utilizado neste trabalho.

#### **2.1.3.2. Comparação entre os modos de vibração através do MAC.**

O MAC (Modal Assurance Criterion) é um indicador estatístico que é mais sensível a grandes diferenças e relativamente insensível a pequenas diferenças nas formas dos modos de vibração. (PASTOR et al. 2012).

Allemang (2003) explica que o MAC surgiu da necessidade de um indicador para os modos de vibração estimados a partir da função resposta em frequência. O autor

explica ainda que um MAC próximo a zero pode indicar que a relação entre os vetores modais não são consistentes, já um MAC próximo a 1 pode ser um indício de que a relação entre os vetores modais é consistente.

Pastor et al. (2012) mostraram a equação utilizada para o MAC, que é calculado como o produto escalar normalizado entre os dois conjuntos de vetores  $\{\varphi_x\}$  e  $\{\varphi_A\}$  conforme equação 1.

$$MAC_{(r,q)} = \frac{(\{\varphi_A\}^T \{\varphi_X\})^2}{(\{\varphi_A\}^T \{\varphi_A\}) (\{\varphi_X\}^T \{\varphi_X\})} \quad (1)$$

$r$   $q$

## 2.1.4 Obtenção dos parâmetros modais

No que diz respeito ao processamento dos sinais medidos para obtenção dos parâmetros modais, tanto a partir das funções espectrais (a exemplo da FRF) quanto pelo sinal de decaimento em vibração livre, a escolha dos procedimentos de processamento irá depender do espaçamento entre as frequências naturais da estrutura. Pode-se deparar com duas situações distintas: modos de vibração afastados e modos de vibração próximos. No primeiro caso, é possível utilizar com boa aproximação técnicas de processamento que assumem a estrutura vibrando apenas em um modo de vibração (como um sistema de um grau de liberdade). No domínio da frequência, isto é obtido pelo ajuste de função teórica de um sistema de um grau de liberdade à função espectral obtida por via experimental. Já no domínio do tempo (para obter um sinal de decaimento em vibração livre), aplica-se uma filtragem no sinal, de modo a eliminar os demais componentes de frequência exceto o de interesse, obtendo-se um sinal de decaimento com predominância de um único modo de vibração. No segundo caso, torna-se necessária a utilização de processos mais complexos que considerem a influência simultânea de mais de um modo na resposta. Esses métodos são conhecidos como métodos de ajuste de curvatura de sistemas de vários graus de liberdade e requerem o auxílio de algoritmos já difundidos na literatura e introduzidos em softwares comerciais, a exemplo do Star Modal.

## 2.2. RELAÇÃO ENTRE DANO/FISSURAÇÃO E OS PARÂMETROS MODAIS

É sabido que estruturas que apresentam rachaduras, fissuras, trincas ou qualquer outro tipo de dano não trabalham da forma pela qual foi pensada pelo seu projetista.

Tais danos podem ser decorrentes de má utilização da estrutura ou falta de manutenção da mesma. No que diz respeito à má utilização, os casos mais recorrentes são de estruturas sobrecarregadas, ou seja, suportando cargas superiores às quais ela foi projetada para suportar, ou de estruturas utilizadas para fins diferentes do que foi proposto inicialmente. Já por falta de manutenção, é comum encontrar estruturas de concreto armado antigas que nunca passaram por nenhum processo de recuperação, que, por sua vez, acabam manifestando uma série de patologias.

Chaudhari et al. (2014) enfatizam que é muito importante que a estrutura funcione sem defeitos porque a existência de um defeito afeta a vida útil para cargas de serviço da estrutura de forma prejudicial.

Uma classificação bem conhecida para os métodos gerais de detecção de dano é baseada na informação que o método pode fornecer, tendo sido definida por Rytter (1993) em quatro níveis:

- Nível 1: Denominado Detecção, o método aqui inserido fornece uma indicação qualitativa do dano que pode estar presente na estrutura.
- Nível 2: Denominado Localização, onde o método dá informações sobre o provável local do dano.
- Nível 3: Denominado Avaliação, o método fornece informações sobre o tamanho do dano.
- Nível 4: Denominado Consequência, o método fornece informações sobre a segurança atual da estrutura dado um certo nível de dano.

Segundo esta classificação, cada nível engloba também as características dos níveis inferiores, e existem métodos de detecção de danos através da utilização dos parâmetros modais que compreendem diferentes níveis de classificação. Assim, é relevante compreender o comportamento dinâmico da estrutura. Danos, fissuras ou rachaduras modificam tal comportamento e observando esta alteração, o tamanho, profundidade e efeito das fissuras podem ser previstos.

Os parâmetros modais de estruturas danificadas e estruturas sãs são diferentes. A formação de fissuras decorrentes de ciclos de carga e descarga levam a fadiga da estrutura e a formação de descontinuidades em sua estrutura interior. (ABDELKRIM et. al. 2011). Danos por fissuras podem causar redução de rigidez da estrutura, com uma consequente redução em suas frequências naturais, um aumento no amortecimento modal, além de mudanças nos modos de vibração. (RATCLIFFE, 1997)



A determinação do estágio de fissuração de uma estrutura através da utilização de testes modais está em constante crescimento. Diversos são os métodos que estão sendo estudados pela comunidade científica.

Curadelli et al. (2008) através de uma modelagem numérica e dois experimentos distintos concluíram que o amortecimento das estruturas estudadas é sensível ao seu estado de deterioração. Em comparação com as estruturas em seu estado são, o autor mostrou um aumento do amortecimento e uma diminuição da frequência natural para estágios de deterioração mais elevados.

Xu et al. (2014) obtiveram resultados positivos na detecção de dano em um modelo experimental de um edifício de 12 andares em aço através de variações na rigidez. Já um estudo com vigas simplesmente apoiadas de concreto armado, Ismail et al. (2012) pretendiam detectar a localização e o grau de dano oriundo de vazios de concretagem mediante a variação na rigidez à flexão, tendo êxito apenas em detectar a localização.

No trabalho de Hu et al. (2011), testes modais foram usados para obtenção dos primeiros modos de vibração em vigas de madeira para variados graus de dano, simulados através da remoção de massa das mesmas. Um algoritmo indicador de dano baseado na comparação da flexibilidade modal local antes e após o dano foi aplicado, conseguindo detectar e localizar os danos para diferentes cenários.

No que tange à validação de modelos matemáticos computacionais a partir de resultados obtidos por testes modais, Chellini et al. (2010) realizaram ensaios modais em um pórtico de aço com lajes de concreto sujeito a vibrações sísmicas, obtendo as propriedades vibratórias para três níveis de degradação e inserindo-as em um modelo de elementos finitos, tendo como objetivo acompanhar a evolução dos danos nas ligações viga-pilar. Hsieh et al. (2008) aplicaram técnicas de detecção de dano usando modelo em elementos finitos analisado com base em ensaios modais, estudando três casos: um puramente numérico, um protótipo em escala de um edifício e uma ponte de concreto com seis vãos. Como resultado, foi possível não apenas localizar como também conhecer a magnitude do dano.

Gao et al. (2015) propuseram um indicador de dano baseado na parte imaginária da Função Resposta em Frequência (FRF), que é relacionada com a flexibilidade modal.

Ensaio realizado em uma placa de aço com dois níveis de danos e diferentes condições de apoio demonstraram efetividade no índice proposto.

Kim et al. (2005) utilizaram o índice proposto por Rodriguez-Gomez e Cakmak (1990) para avaliar o nível de danos causado na estrutura de uma ponte. Os autores elaboraram uma Tabela com os índices limites propostos por Stone et al. (1993), Williams et al. (1997) e Park et al. (1987). Estes índices foram o utilizado neste trabalho para análise global do nível de dano das estruturas testadas.

Kim et al.(2005) utilizaram estes índices para avaliar estruturas danificadas pela ação de terremotos, baseado nas características dinâmicas das estruturas, neste caso, o período fundamental:

$$DI = 1 - \left( \frac{T_{inicial}}{T_{final}} \right)^2 \quad (2)$$

Onde,

DI é o índice de dano da estrutura;

$T_{inicial}$  é o período fundamental da estrutura na inauguração;

$T_{final}$  é o período fundamental da estrutura em um momento posterior à inauguração;

Kim et al. (2005) sugeriram que a partir de um índice de dano 0,7 pode-se considerar início da ruptura e que o início da fissuração pode ser esperado para índice de dano entre 0,10 e 0,20. Um DI igual a 1 significa total ruptura da estrutura, enquanto um DI igual a 0 significa que a mesma não sofreu dano algum. Na Tabela 1 Kim et al. (2005) reuniram os limites do índice de dano apresentados por outros pesquisadores.

<b>Estado de dano</b>	<b>Valor mínimo do índice de dano</b>		
	<b>Park et al. (1987)</b>	<b>Stone et al. (1993)</b>	<b>Williams et al. (1997)</b>
<b>Dano que pode ser reparado</b>	0,10	0,11	0,12
<b>Dano que não pode ser reparado</b>	0,40	0,40	0,39
<b>Colapso</b>	1,00	0,77	1,28

Tabela 1 - Correlação entre o índice de dano e o estado da estrutura (KIM et al. 2005)

Nota-se que o segundo a equação 2, o índice proposto por Williams et al. (1997) para o estado de colapso é um valor impossível de ser encontrado, sendo então o parâmetro de Stone et al. (1993) o valor de referência deste trabalho.

Stone et al. (1993) descreve ainda as características de cada fase do índice de dano:

- Nenhum dano: A estrutura não cedeu, embora algum dano possa ter ocorrido, este não comprometeu o bom funcionamento da estrutura.
- Dano que pode ser reparado: A estrutura cedeu, porém não atingiu sua carga última, sua rigidez é pouco afetada e o custo dita que a estrutura deve ser repara ao invés de substituída.
- Dano que não pode ser reparado: A estrutura foi carregada além de sua carga máxima de uso, mas permanece de pé. A falha completa pode acontecer caso submetida a mais um ciclo de carga e possivelmente todo o elemento estrutural deve ser substituído.
- Colapso: A estrutura falhou completamente e provavelmente irá contribuir com o colapso dos elementos estruturais adjacentes.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Equipamentos utilizados

##### 3.1.1. Célula de carga

A célula de carga é um transdutor que recebe carga e converte a pressão aplicada em pulsos elétricos; ou seja, converte uma excitação mecânica em sinal elétrico, a ser interpretado por um receptor (Figura 1).



Figura 1 – Modelo de célula de carga. (Fonte: Google Imagens)

Células de carga podem medir forças da ordem de grandeza variada. Isso porque a força é, na maioria dos casos, medida através da deformação de um material, o qual pode ser escolhido dependendo da aplicação para que sejam suportadas as cargas necessárias. A célula utilizada para os testes foi do tipo *Gunt Hamburg LT 50/30* e tem capacidade de 30 kN.

##### 3.1.2. LVDTs (Linear Variable Differential Transformer)

O LVDT (Linear Variable Differential Transformer ou Transformador Diferencial Variável Linear) é um sensor para medição de deslocamento linear. Ele converte o movimento retilíneo ao qual está acoplado mecanicamente em um sinal elétrico correspondente.



Figura 2 – Modelo de LVDT semelhante ao utilizado nos ensaios. (Fonte: Google Imagens)

O sensor funciona através de três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Ele dá como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir.

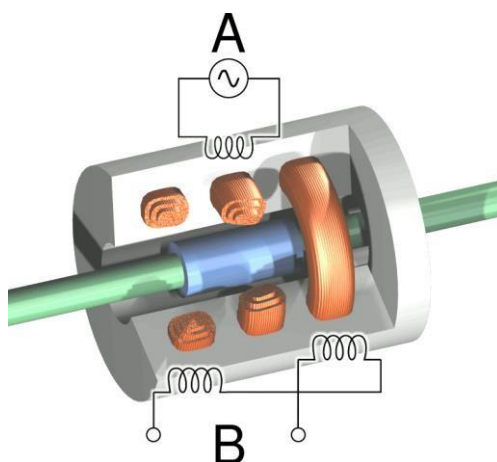


Figura 3 - Vista em corte de um LVDT. A corrente é aplicada na bobina primária A, fazendo com que uma tensão seja induzida em cada bobina secundária B. (Fonte: Wikipédia)

Os sensores utilizados tinham sensibilidade de deslocamento de 0,01mm e curso de 100 mm.

### 3.13. Martelo de impacto

O martelo de impacto consiste de uma marreta dotada de uma cabeça fixa e diferentes pontas. O martelo possui uma célula piezoelétrica em seu interior que, ao sofrer impacto, gera corrente elétrica. Assim, ao excitar a estrutura, um sinal elétrico é gerado, sendo transmitido ao analisador de espectros.

O martelo instrumentado dispõe de pontas com diferentes rigidezes. A sensibilidade dos mesmos é expressa em unidades de voltagem por força (mV/N ou mV/lbf). A escolha da ponta que irá excitar a estrutura depende da rigidez do material excitado. Quanto mais rígidos os materiais, menor será a duração do pulso e, assim, maior será a faixa de frequência coberta pelo impacto. De forma análoga, quanto mais flexível for a ponta do martelo, menor será a faixa de frequência. Dessa forma, a cabeça do martelo escolhida para excitar a estrutura foi a mais flexível disponível, de forma a concentrar a energia de impacto na faixa mais baixa de frequência.

O modelo utilizado nos ensaios é o Tipo 8208, da Brüel&Kjaer. O mesmo é dotado de uma cabeça de 3 libras (1,36078 kg) e quatro pontas com variadas rigidezes. A Figura 4 ilustra o modelo.



Figura 4 – Martelo instrumentado do tipo 8208 da Brüel&Kjaer. (Fonte: Folheto do produto)

### **3.14. Acelerômetro**

Os acelerômetros fazem parte do grupo de equipamentos denominados transdutores, cuja função é converter uma forma de energia (mecânica) em outra (elétrica). Assim como o martelo instrumentado, o acelerômetro é dotado de uma célula piezoelétrica. Contudo, a transdução no acelerômetro se faz de forma indireta, mediante o uso de uma massa sísmica (ou auxiliar), que pode ser esquematicamente observada na Figura 5. Ao excitar a estrutura, o conjunto massa sísmica e corpo do acelerômetro se movem em conjunto, sendo a razão das acelerações da massa sísmica e do corpo do acelerômetro ( $x''/y''$ ), conforme EWINS (1984), unitária para um intervalo de frequência de zero até a primeira frequência ressonante do transdutor.

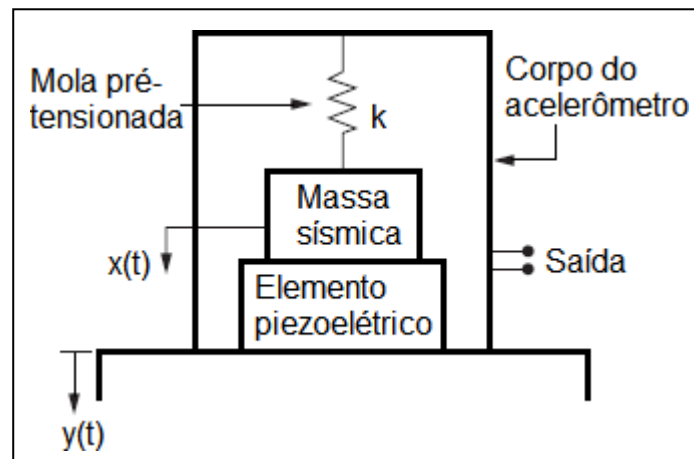


Figura 5 – Acelerômetro piezoelétrico. (KELLY, 2012)

Quando o corpo ao qual o acelerômetro está equipado vibra, a massa sísmica se move em relação ao corpo do transdutor, causando deformação no cristal piezoelétrico, o que gera corrente elétrica, a qual é transmitida ao analisador de espectro já amplificada. O sinal do movimento é da massa sísmica relativa ao corpo do acelerômetro. O entendimento do seu funcionamento pode ser feito a partir da Figura 6, que é um diagrama esquemático de um transdutor piezoelétrico, cujo cristal fornece o amortecimento viscoso ( $c$ ) e a rigidez ( $k$ ).

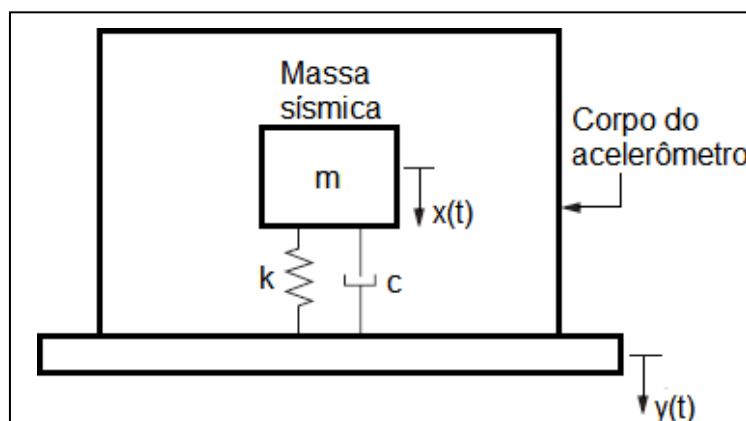


Figura 6 – Esquema do transdutor piezoelétrico (KELLY, 2012)

Nos ensaios realizados, o acelerômetro usado foi o modelo Isotron® 752A13 da Endevco®, com sensibilidade de 1V/g. O modelo, que pode ser visto na Figura 7, possui uma base hexagonal com rosca para fixação e saída de dados na parte superior. O referido modelo atua numa ampla faixa de frequências, indo até 100kHz.



Figura 7 – Acelerômetro utilizado nos testes (Fonte: Arquivo pessoal)

### 3.1.5. Condicionador de sinais

Os sinais emitidos pelo cristal piezoelétrico do acelerômetro não podem ser diretamente fornecidos ao analisador de espectro devido ao fato de terem pequena intensidade. Assim, para que o sinal tenha uma intensidade capaz de ser lida pelo analisador, deve antes passar pelo condicionador de sinais, o qual atua de duas formas: amplificando a carga ou a tensão fornecida pelo acelerômetro.

O condicionador usado nos ensaios foi o modelo 4416B da Endevco®, que pode ser visto na Figura 8.



Figura 8 – Condicionador de sinais (Fonte: Arquivo pessoal)

### 3.1.6. Analisador de espectros

O analisador de espectros tem a função de medir e processar os sinais condicionados das fontes de excitação e resposta. Dos diferentes tipos existentes, o mais comum é o Analisador de Espectro de Fourier (do inglês Fast Fourier Transform, FFT).



Com base nos sinais processados é possível obter propriedades como a taxa de amortecimento, frequências naturais e modos de vibração, seja na forma gráfica ou numérica.

Usou-se nos ensaios o analisador SignalCalc® Ace, da Data Physics, conforme vista na Figura 9. Conforme informa o fabricante no folheto do produto, o equipamento é responsável por toda a etapa de processamento dos sinais, tendo o computador a função de "interface humana e exibição dos dados". Realiza análises em variados domínios: tempo, frequência, amplitude e ordem. Conta com quatro canais de entrada, o que permite a obtenção de respostas em diferentes pontos da estrutura simultaneamente. Conta com uma resolução de 120dB na faixa dinâmica e 40kHz na faixa em tempo real, em conjunto com o zoom e a alta resolução



Figura 9 - Analisador de espectro utilizado nos ensaios. Fonte: Folheto do produto (DataPhysics, 2015)

### **3.2. Estruturas testadas**

Foram confeccionadas em laboratório quatro lajes, sendo duas maciças idênticas e duas nervuradas idênticas. Todas as lajes possuem largura e comprimento de 3,00m x 1,35m, dimensões estas utilizadas por Pimentel et al. (2013) em testes similares para uma laje pré-moldada. A espessura das lajes maciças é de 0,08m e a das lajes nervuradas de 0,26m. Em ambas as lajes, utilizou-se apenas armadura positiva, com aço CA60 de 5,00 mm de diâmetro. As lajes foram dimensionadas considerando os mesmos carregamentos da laje investigada por Pimentel et al. (2013). Para uma maior confiabilidade, duas lajes de cada tipo foram produzidas.

#### **3.2.1. Lajes Maciças**

##### **3.2.1.1. Confeção das lajes maciças**

Após finalizado todo o roteiro de cálculo iniciou-se o processo de confecção das lajes, com a execução das formas e montagem da armadura. Elas foram devidamente nomeadas como laje maciça 1 e laje maciça 2.

Para montagem das formas, foram utilizadas tábuas e madeirites fixados com pregos comuns.

Posteriormente foi montada a armação, utilizando-se aço CA-60 de 5,0 mm de diâmetro e arame recozido para amarração. Foram utilizadas 15 barras com 3,0 m de comprimento e espaçamento de 9,0 cm entre elas para a armadura principal e 14 barras com 1,35 m de comprimento e espaçamento de 22,0 cm entre elas para a armadura secundária. Todas as barras tiveram 4,0 cm a mais, dobrados em 90° em suas extremidades, como comprimento de ancoragem.

Foram confeccionados 8 ganchos metálicos (4 para cada laje) com o intuito de içar as lajes para posicioná-las sobre os apoios. Espaçadores plásticos com 2,0 cm de altura foram utilizados para que se respeitasse o cobrimento das lajes. A Figura 10 mostra a forma da laje maciça 1 com a grelha inserida, em etapa anterior à concretagem.

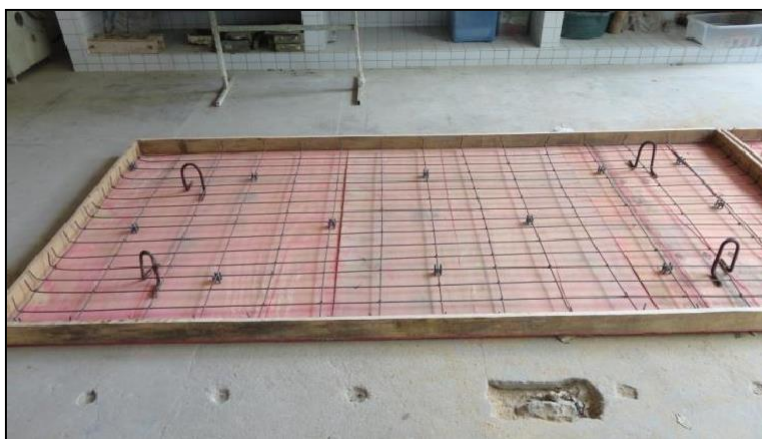


Figura 10 - Forma da laje maciça com a grelha, espaçadores e ganchos já posicionados.

A fim de produzir um modelo mais preciso, a armadura das duas lajes tiveram todas as suas medidas anotadas antes da concretagem e, a seguir, produziu-se um modelo das mesmas em programa CAD. Isso se fez necessário para que trabalhos futuros possam desenvolver modelos de análise estrutural bem como para futuras

conferências e esclarecimento de dúvidas. Na Figura 11 está representado o modelo CAD da laje maciça 1.

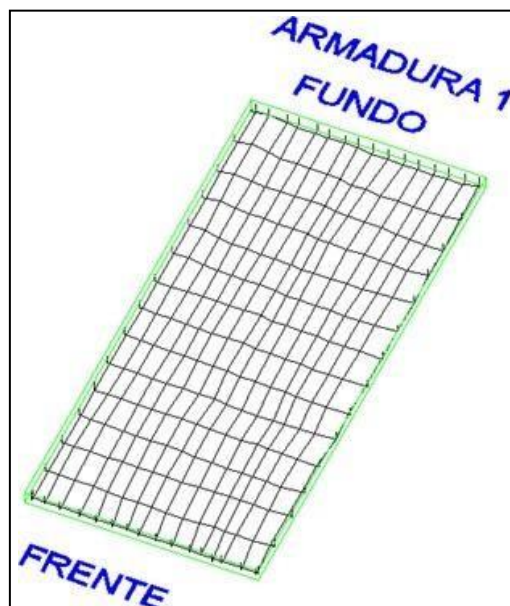


Figura 11 - Modelo CAD de representação da armadura da laje maciça 1.

Após, procedeu-se com a concretagem simultânea das lajes. O concreto utilizado, cuja resistência estimada ( $f_{ck}$ ) era de 25 MPa, tinha traço em peso (TUP) de 1:2,26:2,60-0,54, em que, 1 unidade de peso de cimento, foi misturada a 2,26 unidades de peso de areia, a 2,60 unidades de peso de brita, com uma relação água/cimento de 0,54. O cimento foi do tipo CPV-ARI. Não foram utilizados adições ou aditivos.

Foram confeccionados 15 corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, obtidos conforme a NBR NM33, moldados e curados no mesmo ambiente das lajes conforme NBR 5758, para que a obtenção da resistência à compressão do concreto fosse a mais próxima possível da resistência à compressão do concreto utilizado nas lajes.

Cada laje foi marcada com marcador permanente a fim de facilitar a identificação. Foram também marcados os corpos de prova.

A Tabela 2 mostra os resultados das resistências à compressão do concreto e a Figura 12 apresenta o gráfico da distribuição normal das resistências à compressão dos corpos de prova e mostra o  $f_{ck}$  como sendo o valor de resistência à compressão que apresenta uma probabilidade de 5% de não ser alcançado. O  $f_{ck}$  encontrado foi de 24,7 MPa, um pouco abaixo do  $f_{ck}$  utilizado no dimensionamento que foi de 25 MPa.

RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA - LAJES MACIÇAS		
Corpo de prova	Carga (kgf)	Resistência (MPa)
1	20000	25,465
2	23200	29,539
3	24800	31,576
4	19000	24,192
5	22000	28,011
6	19000	24,192
7	22000	28,011
8	22600	28,775
9	22600	28,775
10	23900	30,430
11	23600	30,048
12	22600	28,775
13	27000	34,377
14	22000	28,011
15	22000	28,011

Tabela 2 – Resistências à compressão dos corpos de prova do concreto utilizado nas lajes maciças.

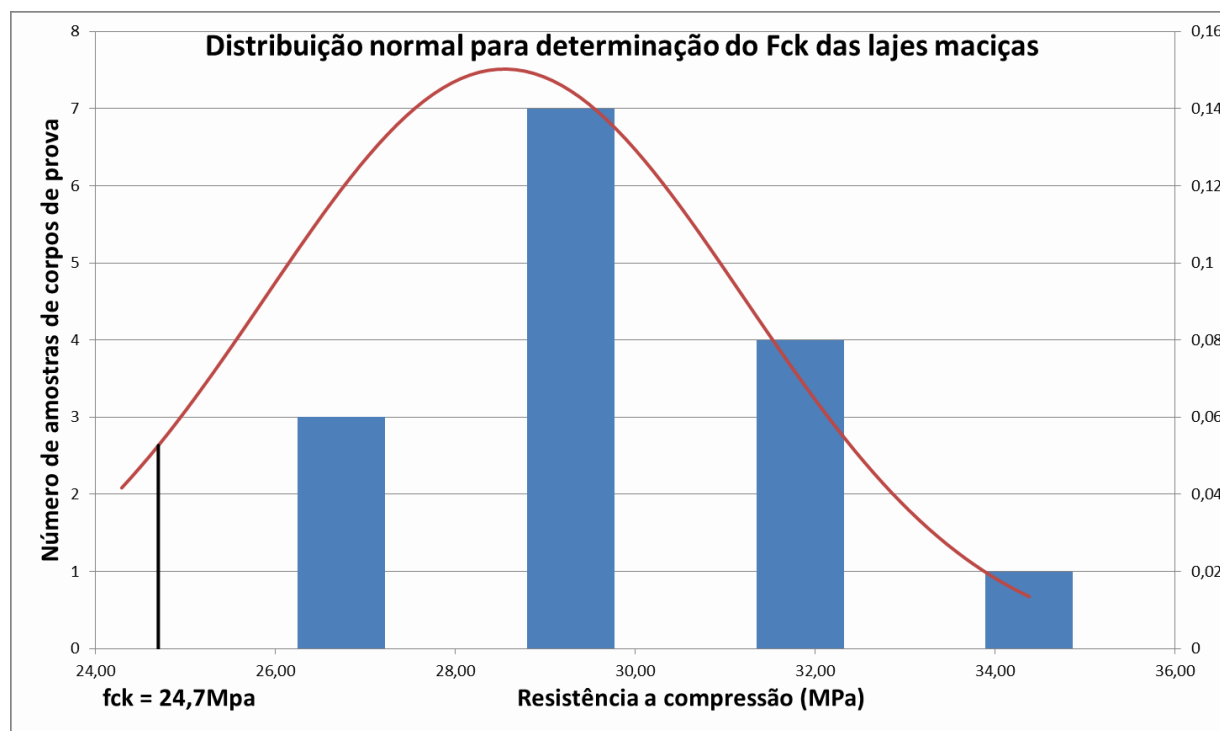


Figura 12 – Distribuição normal para obtenção do fck do concreto utilizado nas lajes maciças.

A cura das lajes foi realizada em ambiente sombreado e mantendo-se a superfície úmida por 21 dias, com inspeções e molhagens diárias. Para que se obtivessem resultados que representassem mais fielmente a realidade optou-se por curar os corpos de prova juntos às lajes, todos sob as mesmas condições.

#### **3.2.1.2. Testes estáticos e dinâmicos das lajes maciças**

Enquanto transcorria a cura, a célula de carga a ser usada nos ensaios foi calibrada.

Procedeu-se também a divisão das lajes e marcação preliminar de pontos de realização de excitação e/ou medição, uma vez que os nós das bordas apoiadas ainda viriam a ser deslocados para o ponto médio dos apoios. Os 300 cm de comprimento foram divididos em seis partes de 50 cm cada e os 135 cm de largura foram divididos em quatro partes de 33,75cm. Assim, cada laje foi dividida em vinte retângulos de 50 cm por 33,75 cm. As arestas destes retângulos foram demarcadas. Além disso, a linha central ao longo do comprimento foi novamente dividida em dez partes iguais de 25 cm e cada nó foi marcado. Os nós foram marcados com o intuito de identificar os locais onde iriam ser aplicadas as excitações de impacto para realização dos testes modais. Tendo em vista que o esquema de marcação era preliminar, pois poderia sofrer modificações após o assentamento da laje, os nós não foram enumerados inicialmente. O mesmo esquema de marcação foi feito nas duas lajes. A Figura 13 ilustra a marcação preliminar feita nas duas lajes.

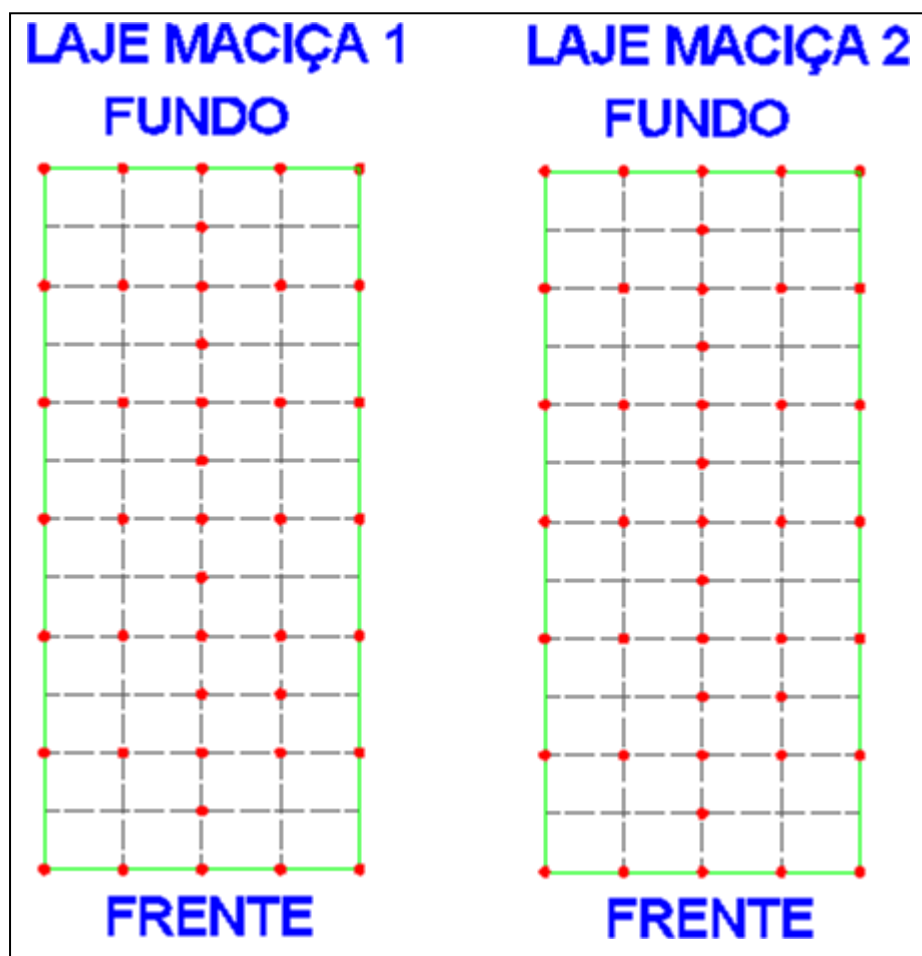


Figura 13 - Nós preliminares das lajes.

Feitas as marcações preliminares, a primeira laje a ser ensaiada (laje maciça 1) foi içada com auxílio dos cabos de aço amarrados aos ganchos, além do macaco hidráulico preso a um pórtico metálico. A Figura 14 ilustra a laje recém apoiada após ter sido içada.



Figura 14 - Laje maciça sobre os apoios após ter sido içada com auxílio de cabos de aço.

Para confecção dos apoios do sistema foram utilizados dois suportes de concreto, um tubo metálico e dois perfis metálicos em “I”. A Figura 14 mostra os dois suportes de concreto que foram utilizados com o fim de apoiar a laje para realização dos ensaios. Os dois perfis metálicos foram fixados nas bordas inferiores da laje com o auxílio de argamassa simples. Sabe-se que a argamassa não possui boa aderência ao perfil metálico, mas esta teria a função apenas de conformar a superfície do perfil e evitar possíveis trepidações nos testes modais que se sucederiam. O tubo metálico foi colado com argamassa em um dos suportes de concreto. E por fim, a laje com os perfis metálicos foi apoiada sobre os suportes de concreto (o perfil frontal foi apoiado diretamente em um suporte de concreto e o perfil do fundo foi apoiado sobre o tubo metálico que estava apoiado no outro suporte). Esta forma foi pensada para simular um sistema isostático, onde haveria um apoio de primeiro gênero e outro de segundo gênero para a laje. Na Figura 15 estão detalhados os apoios da frente (a) e fundo (b), respectivamente. A Figura 16 mostra o sistema isostático utilizado.



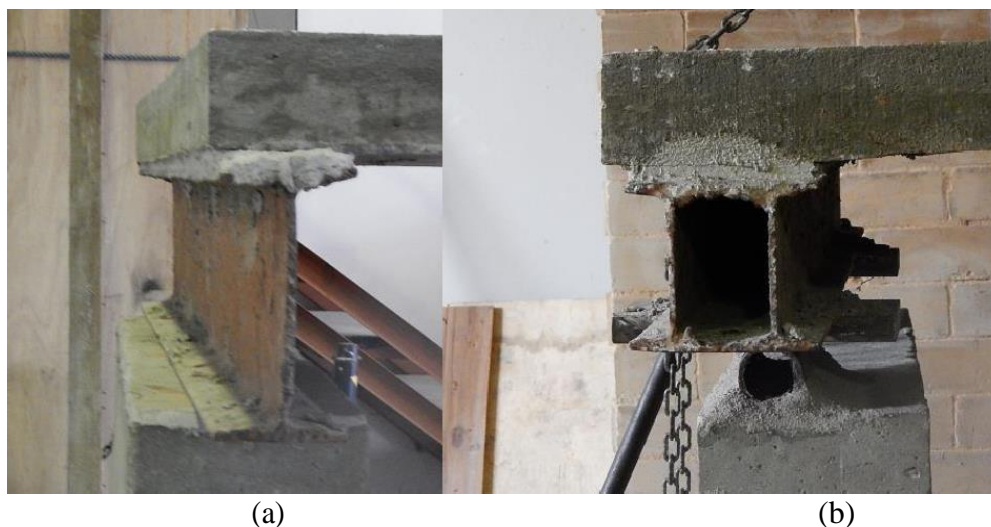


Figura 15 - Detalhe dos apoios da laje sendo (a) apoio frontal e (b) apoio do fundo

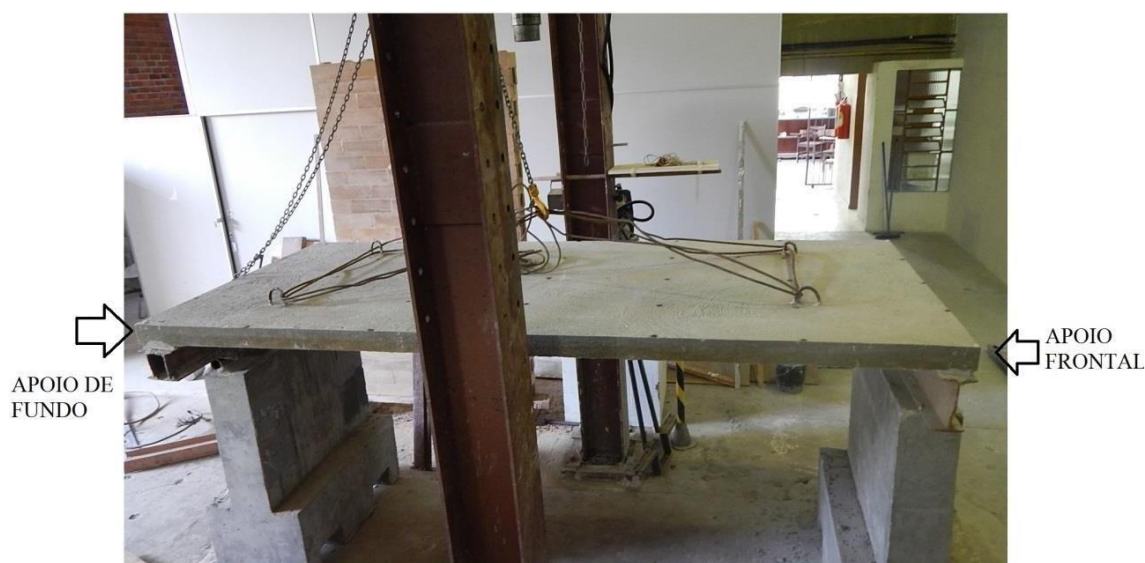


Figura 16 - Esquema isostático da laje maciça - sendo o apoio de fundo do primeiro gênero e o frontal do segundo gênero.

Após o posicionamento da laje 1, ajustes nos nós preliminarmente marcados foram realizados. Os nós localizados nos extremos transversais da laje, que estavam sobre os apoios, foram deslocados em direção aos perfis, de modo que seu alinhamento coincidissem com a linha média destes. Concluídos estes ajustes, foi definido também o nó onde ficaria o acelerômetro, para a medição das respostas devido à excitação aplicada. Finda esta etapa, os nós foram devidamente enumerados, sendo o modelo CAD, previamente feito, corrigido. Visando buscar igualdade de resultados nos ensaios, a mesma marcação e posicionamento de perfis de apoio foi mantida na segunda laje ensaiada. A Figura 17 ilustra a posição final dos nós na laje 1.



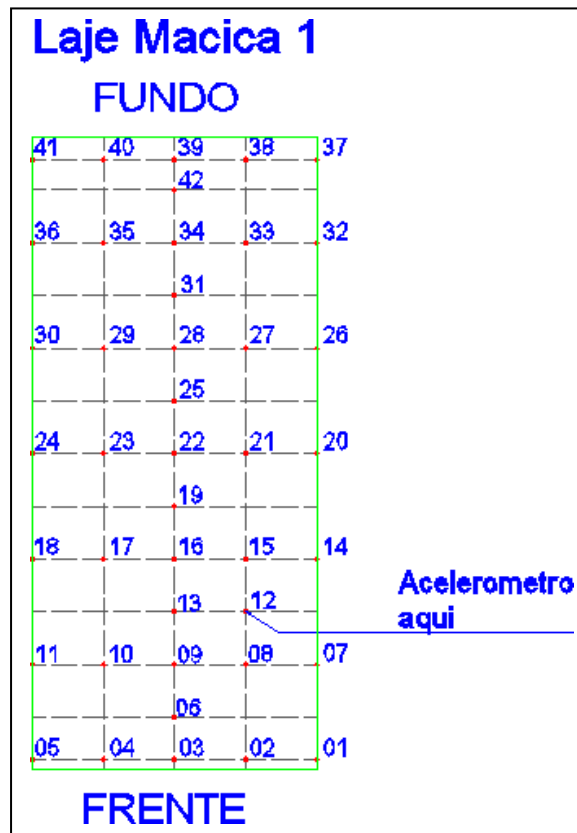


Figura 17 – Posição final dos nós com sua devida numeração.

A fim de acompanhar o surgimento e progresso das fissuras para os diferentes níveis de carregamento, uma malha retangular igual à feita na superfície superior da laje foi feita na face inferior, mantendo-se o mesmo esquema de numeração. Assim, à medida que novos estágios de carga fossem sendo aplicados e as fissuras surgissem, seria possível acompanhá-los e, com isso, criar um mapa de fissuração.

Para montagem do sistema de transmissão de carga, utilizaram-se três perfis metálicos, sendo dois transversais e o terceiro paralelo à maior dimensão da laje. O perfil paralelo foi posicionado de forma que seu eixo coincidisse com a linha longitudinal central da laje. Uma placa metálica foi colocada sobre o perfil transversal e, por fim, foi posicionada a célula de carga com o macaco hidráulico. Para nivelar os perfis, foi colocada uma camada de gesso no contato entre eles e a laje. Registrou-se a posição ocupada pelos perfis longitudinais e tanto os perfis como a placa metálica foram enumerados para que, ao final dos testes, fossem pesados e adequadamente considerados na análise. A Figura 18 ilustra o sistema descrito.



Figura 18 - Sistema de aplicação de carga na laje.

Com o intuito de registrar as deflexões sofridas pelas lajes durante os testes, foram posicionados três LVDTs. Esses três sensores ficaram apoiados em colunas de tijolos por baixo das lajes em pontos estrategicamente escolhidos para medir a deformação da laje. Eles ficaram distribuídos em linha, um no centro da laje, enquanto os outros dois foram posicionados nas linhas dos terços de comprimento da laje, onde estavam os perfis metálicos transversais. Os sensores utilizados estavam interligados a um sistema de aquisição de dados em separado do utilizado para os testes dinâmicos. Todos eles operaram por baixo da laje e mediram as deflexões até o limite do curso dos aparelhos, que era anterior às deflexões da ruptura da laje.



Figura 19 - Posicionamento dos LVDT's da laje maciça 1

Posteriormente a toda preparação, marcação e posicionamento da primeira laje, sucedeu-se o início dos ensaios propriamente ditos. A laje foi submetida a ciclos de carga e descarga em três cargas inferiores a carga última, sendo estas por volta de 8kN, 16kN e 22kN. Um teste modal foi realizado após cada descarregamento, além de um teste modal com a laje sã, este último antes da aplicação de qualquer carregamento.

Estando a laje 1 montada e devidamente marcada, preparou-se os equipamentos para dar início aos testes modais. Nos testes modais foi utilizado um martelo instrumentado, um acelerômetro, um condicionador de sinais, um analisador de espectros e um notebook com software para processamento dos dados. A laje foi excitada por cargas de impacto através do martelo e as acelerações produzidas captadas pelo acelerômetro. Um analisador de espectro foi utilizado para o processamento dos dados e foram obtidas as funções resposta em frequência (FRFs), os espectros de resposta da aceleração medida, assim como os sinais de respostas no domínio do tempo.

As cargas de impacto foram aplicadas em todos os pontos marcados sobre a laje, sendo cada ponto excitado cinco vezes e a média das FRF's das cinco excitações foi obtida pelo sistema. O acelerômetro foi posicionado no nó 12 e ali permaneceu durante todo o teste, de modo a posteriormente construir as formas modais. Para cada excitação, o software do analisador que é executado no notebook exibe um gráfico preliminar do resultado obtido após cada impacto, cabendo ao analista aceitá-lo ou rejeitá-lo e repetir a medição. Os dados eram salvos em uma pasta específica e nomeados de acordo com a data, tipo de ensaio, nó excitado e nó do acelerômetro.

Além dos testes modais já descritos, outros foram feitos com o intuito de avaliar se a estrutura encontrava-se no regime elástico-linear. Os testes realizados foram os de linearidade (HERMEZ et al. 2012), repetibilidade e de reciprocidade (RAO, 2012).

No teste de repetibilidade, o mesmo par de pontos de excitação e resposta é ensaiado repetidas vezes e devem apresentar os mesmos resultados.

O teste de linearidade consiste na aplicação de cargas de impacto com diferentes intensidades no mesmo nó, com intuito de mostrar se a intensidade do impacto influenciaria na resposta obtida - a expectativa em um sistema linear é que não houvesse variação alguma na FRF obtida sob ambas as condições. Este teste foi realizado no nó 12, onde foi posicionado o acelerômetro e também aplicadas as cargas de impacto.

No teste de reciprocidade, avaliam-se as FRF's obtidas em pontos distintos, pela inversão da posição entre ponto de excitação e ponto de resposta. Como os sinais captados foram obtidos pela leitura do acelerômetro no nó 12, no teste de reciprocidade escolheram-se alguns pontos aleatoriamente para posicionamento do acelerômetro e aplicaram-se as cargas de impacto no nó 12, imediatamente ao lado do acelerômetro. Espera-se que pares de FRF's obtidas sejam idealmente idênticas as obtidas inicialmente.

Após os testes modais na laje sã, o primeiro estágio de carga foi aplicado, atingindo-se o valor de 16kN. A carga estipulada para o primeiro estágio era de 8 kN, porém devido a um problema do manuseador do sistema de transmissão de carga, foi aplicada uma carga desconhecida, estimada entre 8kN e 16kN - tal erro foi corrigido para a segunda laje. Uma Tabela com data, carga de ensaio e deslocamento para cada LVDT foi elaborada. Assim, para cada valor de carga aplicado, interrompia-se o carregamento anotava-se o valor da deflexão e se dava continuidade ao carregamento. Quando um LVDT atingia o fim de seu curso, tal informação era anotada na Tabela e o equipamento era removido, prosseguindo o ensaio com os sensores remanescentes. Quando o último LVDT atingia seu curso, era removido e o carregamento prosseguia até a carga desejada daquele ensaio. Ao final, a carga era removida vagarosamente e todo o sistema de transmissão de carga era removido. A etapa seguinte era a busca pelas fissuras que haviam surgido marcando sua posição ao longo da laje com marcador permanente para, posteriormente, elaborar um mapa de fissuras em programa CAD.

Este procedimento foi repetido para todos os estágios de carga. Em cada estágio, as novas fissuras que surgiram foram marcadas com marcador permanente de cor diferente da usada nos estágios anteriores de fissuração.

A última etapa de testes modais foi então realizada, após aplicação da carga de 22 kN e, em seguida, todo o sistema do teste estático remontado para determinação da carga de ruptura da laje. Após o último LVDT atingir seu curso e ser removido, prosseguiu-se com o carregamento da laje até o seu colapso. A laje rompeu quando o indicador digital marcava 44, correspondendo a 23,926 kN, que somados ao peso dos perfis totaliza-se uma carga aplicada de 25,198 kN.

O rol de dados adquiridos foi organizado e dividido para ser processado, ao mesmo tempo em que a segunda laje era posicionada para ser ensaiada.

### **3.2.1.3. Processamento de dados das lajes maciças**

No que se refere ao processamento de dados, três diferentes procedimentos podem ser utilizados para obtenção das frequências naturais e razão de amortecimento, para um determinado modo de vibração, considerado isolado e assemelhado a um sistema de um grau de liberdade. O primeiro faz a identificação dos valores das frequências de pico como frequências naturais aplicando o “half power method” para obtenção da razão de amortecimento. O segundo faz o ajuste de função espectral teórica ao espectro experimental por mínimos quadrados. E o terceiro método utiliza o sinal filtrado de resposta no domínio do tempo, identificando as frequências através do período de oscilação e a razão de amortecimento pelo gráfico do logaritmo neperiano dos picos de resposta ao longo do decaimento. Este último foi o método utilizado no trabalho.

Já para obtenção dos modos e para o processamento considerando vários modos, foi utilizado o software StarModal.

## **3.2.2. Lajes Nervuradas**

A NBR 6118 (2014) define lajes nervuradas como as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.

Carvalho et al. (2013) enfatizam que a ideia que levou ao surgimento dessas lajes é que para vão de grandes dimensões, as lajes maciças geralmente apresentam, pelo menos no Estado Limite Último, uma pequena região de concreto comprimido e,

portanto, há muito concreto abaixo da linha neutra que está tracionado, o que, nesta situação, não colabora na resistência a flexão; assim, nada mais racional do que substituir uma parte desse concreto por material inerte (mais leve e mais barato que o concreto) ou simplesmente moldar com fôrmas uma região tracionada composta apenas de nervuras.

Sabendo então que as lajes nervuradas são utilizadas para redução do consumo de concreto, o consumo de formas também não deve ser alto, então, uma solução bastante adotada é a utilização de moldes de plástico reforçado, reaproveitáveis, para a confecção das nervuras. Tal solução foi a adotada para as lajes confeccionadas neste trabalho. A Figura 20 ilustra um exemplo de laje nervurada construída e moldada com caixotes plásticos.



Figura 20 – Laje nervurada moldadas com caixotes plásticos. (Fonte: Google Imagens).

#### **3.2.2.1. Confecção das lajes nervuradas**

Depois de finalizado todo o roteiro de cálculo iniciou-se o processo de confecção das lajes, com a execução das formas e montagem da armadura. Elas foram devidamente nomeadas como laje nervurada 1 e laje nervurada 2.

Para montagem das formas, foram utilizadas tábuas e madeirites fixados com pregos comuns.

Posteriormente foi montada a armação, utilizando-se aço CA-60 de 5,0 mm de diâmetro e arame recozido para amarração. Foram utilizadas 6 barras com 3,0 m de comprimento, posicionadas entre as caixas plásticas para armadura principal e para armadura secundária 5 barras com 1,35 m de comprimento, também posicionadas entre as caixas plásticas, porém no sentido da menor direção. Todas as barras tiveram



4,0 cm a mais, dobrados em 90° em suas extremidades, como comprimento de ancoragem. Foram utilizadas oito caixas plásticas com dimensões padrão em cada laje.

Assim como utilizado nas lajes maciças, também foram confeccionados 8 ganchos metálicos (4 para cada laje) com o intuito de içar as lajes para posicioná-las sobre os apoios. Espaçadores plásticos com 2,0 cm de altura foram utilizados para que se respeitasse o cobrimento da laje (2,0cm). A Figura 21 mostra a forma da laje nervurada 1 com a grelha e as caixas plásticas devidamente posicionadas, em etapa anterior à concretagem.



Figura 21 - Forma da laje nervurada com a grelha, espaçadores e ganchos já posicionados.

Após, procedeu-se com a concretagem simultânea das lajes. O concreto utilizado, cuja resistência estimada ( $f_{ck}$ ) era de 25 MPa, tinha traço em peso (TUP) de de 1:1,66:1,92-0,48, em que, 1 unidade de peso de cimento, foi misturada a 1,66 unidades de peso de areia, a 1,92 unidades de peso de brita, com uma relação água/cimento de 0,48. O cimento foi do tipo CPV-ARI. Não foram utilizados adições ou aditivos. Apesar da necessidade de se obter o mesmo  $f_{ck}$  obtido para as lajes maciças, o traço utilizado foi diferente devido à características dos materiais (areia e brita) disponíveis no momento.

Foram confeccionados 13 corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, obtidos conforme NBR NM33, moldados e curados no mesmo ambiente das lajes de acordo com a NBR 5738, para que a obtenção da resistência à compressão do concreto fosse a mais próxima possível da resistência à compressão do concreto nas lajes.

Cada laje foi marcada com marcador permanente a fim de facilitar a identificação. Foram também marcados os corpos de prova.

A Tabela 3 mostra os resultados das resistências características à compressão do concreto e a Figura 22 apresenta o gráfico da distribuição normal das resistências à compressão dos corpos de prova e mostra o  $f_{ck}$  como sendo o valor de resistência à compressão que apresenta uma probabilidade de 5% de não ser alcançado. O  $f_{ck}$  encontrado foi de 28,37 MPa, acima do  $f_{ck}$  utilizado no dimensionamento que foi de 25MPa.

RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA - LAJES NERVURADAS		
Corpo de prova	Carga (Kgf)	Resistência (MPa)
1	32800	41,762
2	35200	44,818
3	39000	49,656
4	21400	27,247
5	37600	47,874
6	30200	38,452
7	30600	38,961
8	25400	32,340
9	32600	41,508
10	36200	46,091
11	27400	34,887
12	32200	40,998
13	30400	38,706

Tabela 3 - Resistências à compressão dos corpos de prova do concreto utilizado nas lajes nervuradas.



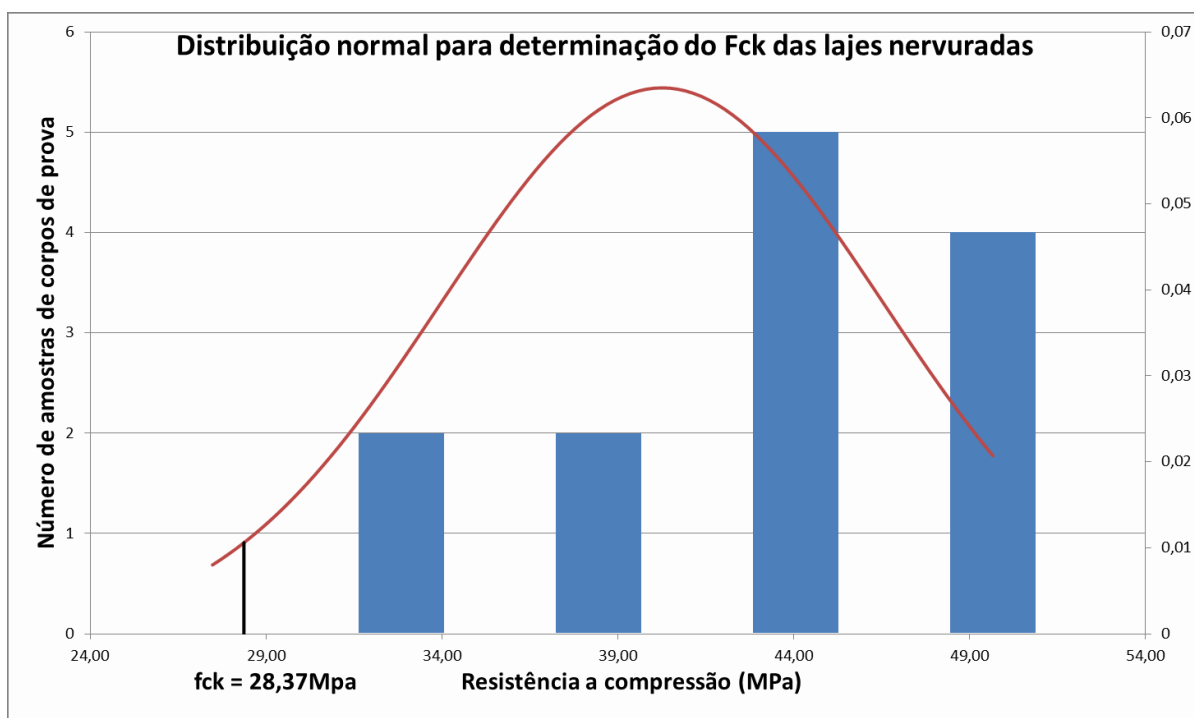


Figura 22 - Distribuição normal para obtenção do fck do concreto utilizado nas lajes nervuradas.

A cura das lajes foi realizada em ambiente sombreado e, com auxílio de sacos de cimento, manteve-se a superfície úmida por 21 dias, com inspeções e molhagens diárias. Para que se obtivessem resultados que representassem mais fielmente a realidade optou-se por curar os corpos de prova juntos às lajes, todos sob as mesmas condições. A Figura 23 ilustra a cura das lajes nervuradas e de seus corpos de prova.



Figura 23 – Cura das lajes nervuradas e de seus corpos de prova

#### **3.2.2.2. Testes estáticos e dinâmicos das lajes nervuradas**

O processo para os ensaios das lajes nervuradas foi, em linhas gerais, análogo ao feito para as lajes maciças. Primeiramente, enquanto transcorria a cura, a célula de carga a ser usada nos ensaios foi calibrada. Procedeu-se também a divisão das lajes e marcação de nós preliminarmente em processo idêntico ao das lajes maciças já que todas as lajes possuem as mesmas dimensões.

Feitas as marcações preliminares, a primeira laje a ser ensaiada (laje nervurada 1) foi içada com auxílio dos cabos de aço amarrados aos ganchos, além do uso do macaco hidráulico preso a um pórtico metálico.

Para confecção dos apoios não foi utilizado o mesmo sistema de perfis metálicos das lajes maciças, visto que, as lajes nervuradas são bem maiores em espessura por sua natureza. Foi confeccionado um sistema de chapas, cantoneiras e tubos metálicos fixados aos apoios para que trabalhassem de maneira similar ao utilizado nas lajes maciças. A Figura 24 mostra o apoio do fundo da laje nervurada 1.

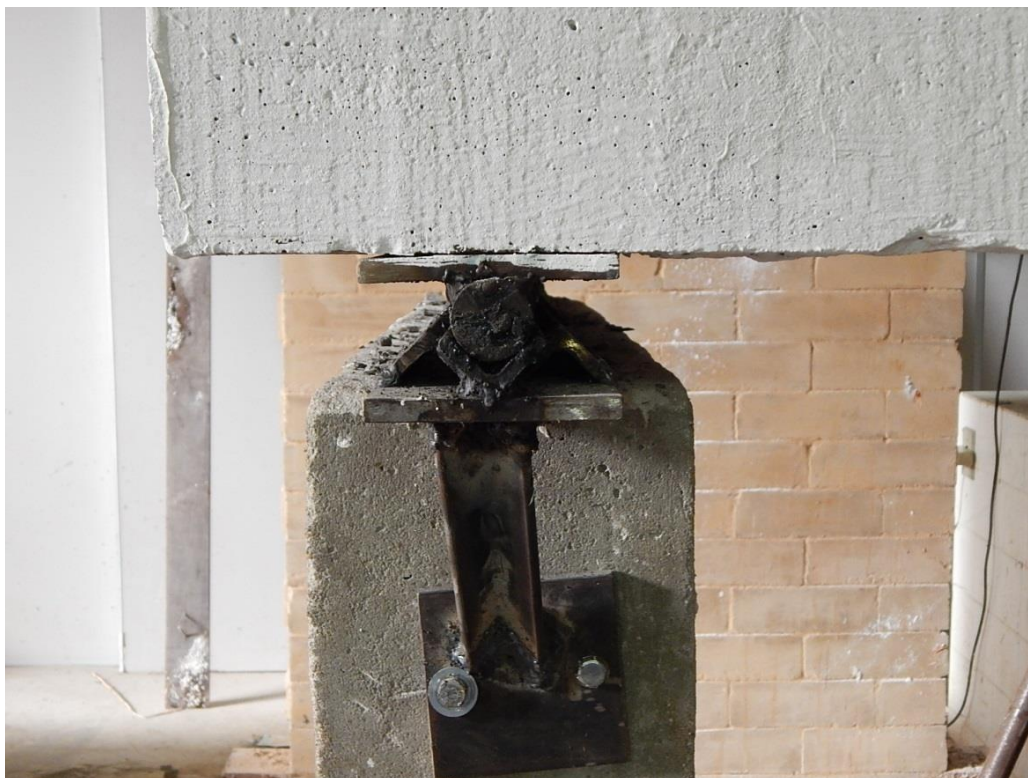


Figura 24 – Apoio do fundo da laje nervurada

O sistema de transmissão de carga e os LVDT's foram os mesmos utilizados para os testes nas lajes maciças. Os LVDT's foram posicionados da mesma forma das lajes maciças, no caso das lajes nervuradas, sempre nas zonas de concreto tracionado. As Figuras 25 e 26 mostram o sistema de aplicação de carga e os LVDT's.





Figura 25 - Sistema de aplicação de carga na laje nervurada 1.



Figura 26 - Posicionamento dos LVDT's da laje nervurada 1

Posteriormente a toda preparação, marcação e posicionamento da primeira laje, sucedeu-se o início dos ensaios propriamente ditos. As lajes nervuradas também foram submetidas a ciclos de carga e descarga em quatro cargas inferiores a carga última, sendo estas por volta de 8 kN, 16 kN, 22 kN e 28 kN. Um teste modal foi realizado após

cada descarregamento, além de um teste modal com a laje sã, este último antes da aplicação de qualquer carregamento.

Processo idêntico ao utilizado para as lajes maciças também foi feito para as lajes nervuradas no que diz respeito a testes modais, aplicação de carga e anotação das deflexões. A Figura 27 ilustra os testes modais aplicados após a aplicação de um determinado estágio de carga.



Figura 27 – Teste modal na laje nervurada 1

Apesar de ter sido calculada para os mesmos dados de entrada das lajes maciças, por natureza, a laje nervurada possui uma rigidez bem maior, e seu rompimento se deu a uma carga de aproximadamente 45,3 kN, incluindo o peso dos perfis.

### **3.2.2.3. Processamento de dados das lajes nervuradas**

De forma análoga ao processamento das lajes maciças, para a obtenção das frequências naturais e coeficientes de amortecimento, o processamento dos dados das

lajes nervuradas seguiu dois procedimentos distintos. O primeiro foi pelo método do decaimento, nos casos em que foi possível o isolamento dos modos assemelhando a um sistema de um grau de liberdade. Já para obtenção dos modos e para o processamento considerando vários modos, foi utilizado o software StarModal.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Testes estáticos nas lajes maciças

#### a) Laje maciça 1

Para a laje maciça 1, foram estabelecidos três estágios de carga, a saber: Estágios X (até 16 kN), Y (até 22 kN) e Z (até o colapso da estrutura, que ocorreu na carga de aproximadamente 24kN). Vale salientar que antes do início do ensaio propriamente dito a laje suportou o peso do sistema de perfis metálicos onde era aplicada a carga que foi de 1,27 kN.

Não foi possível obter leitura para o estágio inicial (8kN) nessa laje, devido a um problema operacional com a célula de carga.

As deflexões verificadas no elemento estrutural são apresentadas nas Figuras 28,29 e 30.

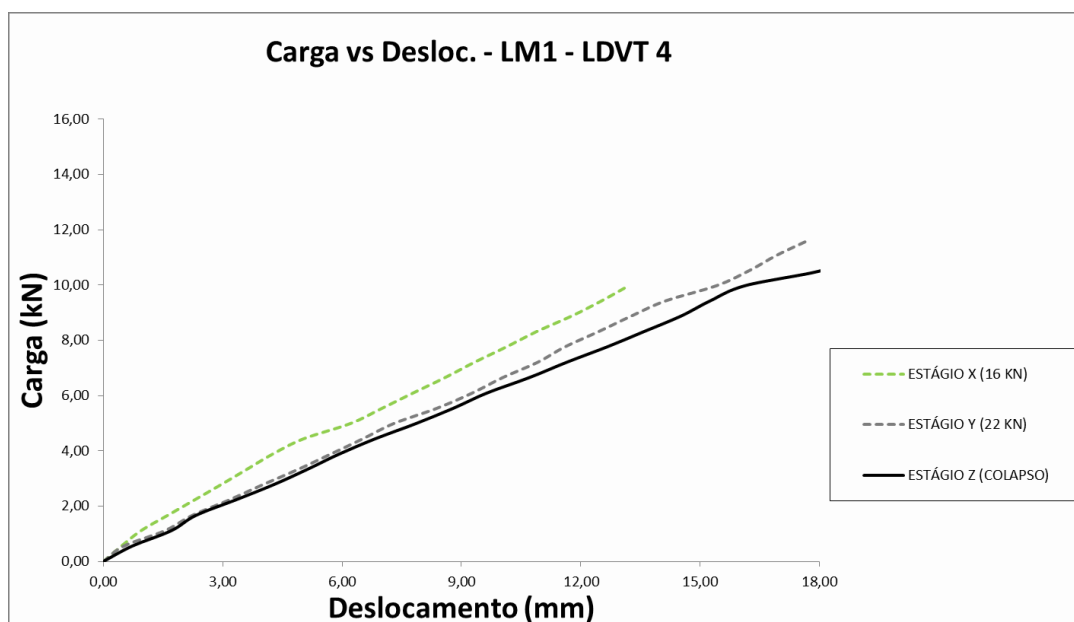


Figura 28 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje maciça 1

Nota-se que, com a aplicação de cargas de maior magnitude, ocorre diminuição da rigidez da laje, resultando em um menor coeficiente angular no gráfico. Isso pode ser explicado fisicamente pela diminuição do momento de inércia de uma seção fissurada ( $I$ ). Portanto, há minoração da rigidez à flexão da estrutura (representada pelo produto  $EI$ ), como efeito de aplicação de carregamentos de maior magnitude. A mesma tendência de perda de rigidez é apresentada nas curvas do LVDT 6 e do LVDT 8 (Figura 29 e 30, respectivamente)

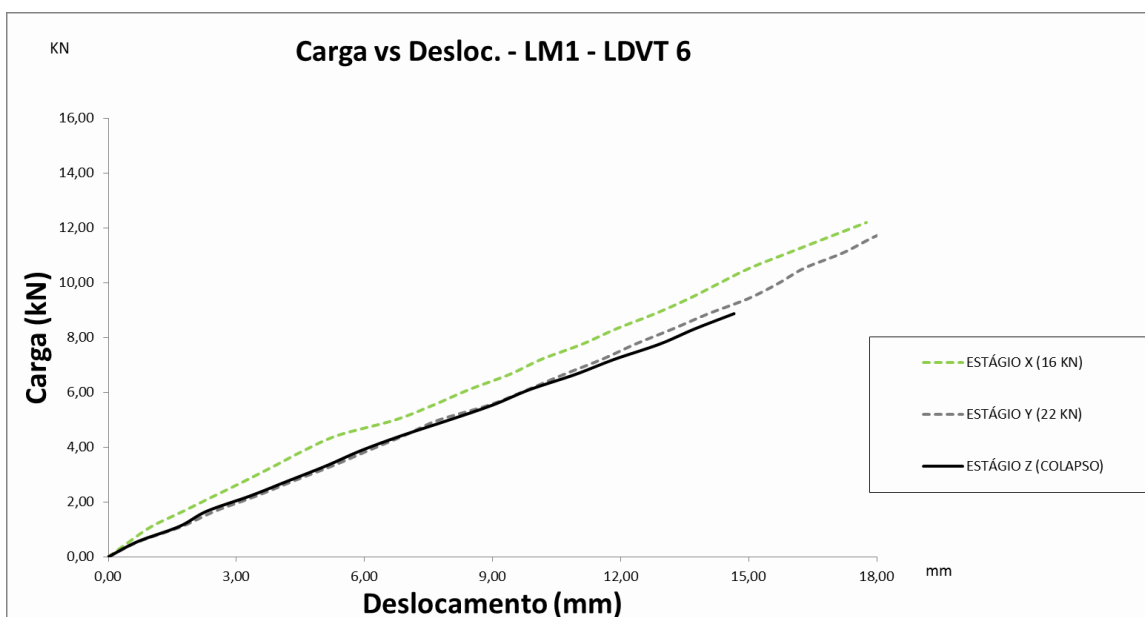


Figura 29 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje maciça 1

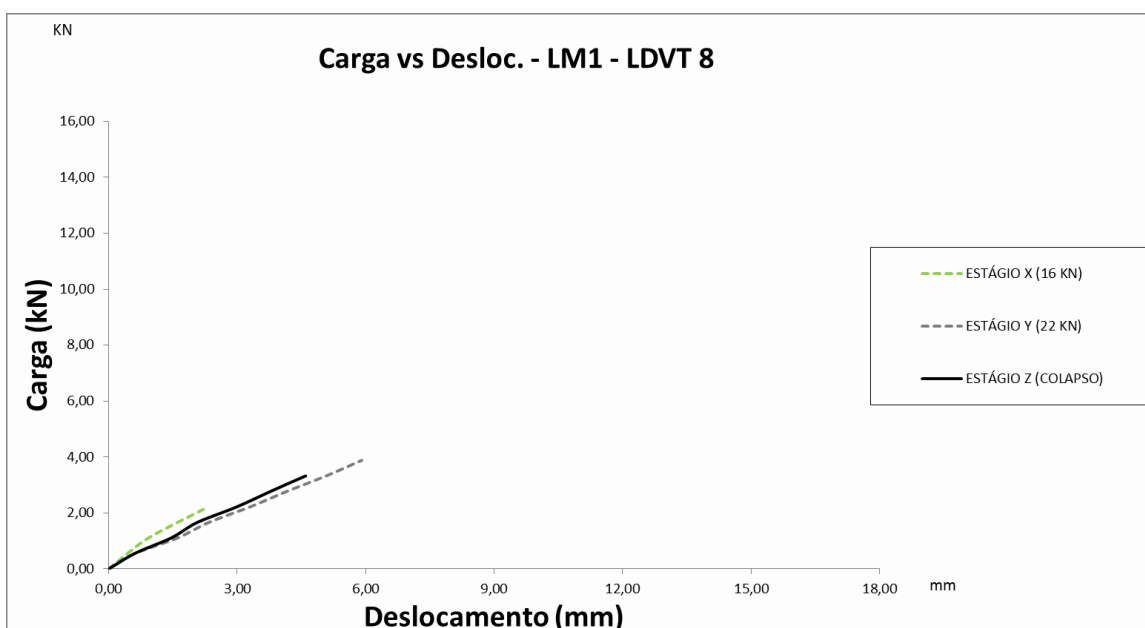


Figura 30 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje maciça 1

## b) Laje maciça 2

Para a laje 2, foram estabelecidos quatro estágios de carregamento, a saber: Estágios W (até 8 kN), X (até 16 kN), Y (até 22 kN) e Z (até o colapso estrutural ser atingido, também em 24kN). Da mesma forma o sistema de 1,27 kN também foi utilizado para aplicação de carga na laje 2.

A seguir, os resultados de deslocamento para a segunda laje maciça são apresentados em curvas distintas correspondente aos diferentes estágios de carga.



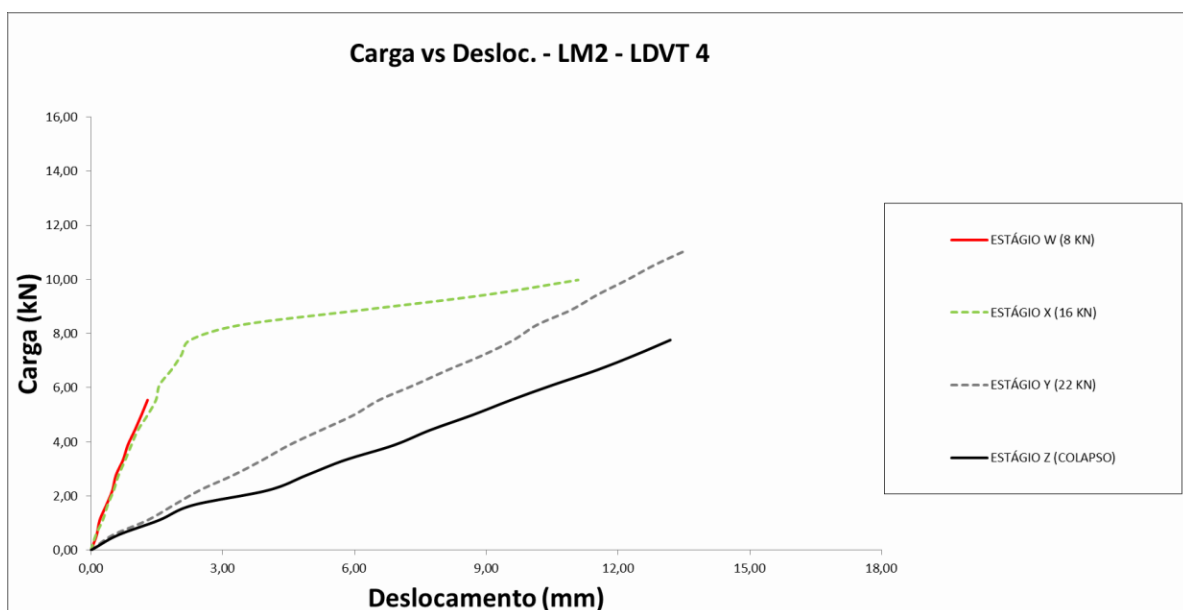


Figura 31- Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje maciça 2.

Para o LVDT 6 (localizado na metade do vão da laje) e para o LVDT 8 (situado próximo ao apoio da frente da laje), tem-se as seguintes curvas:

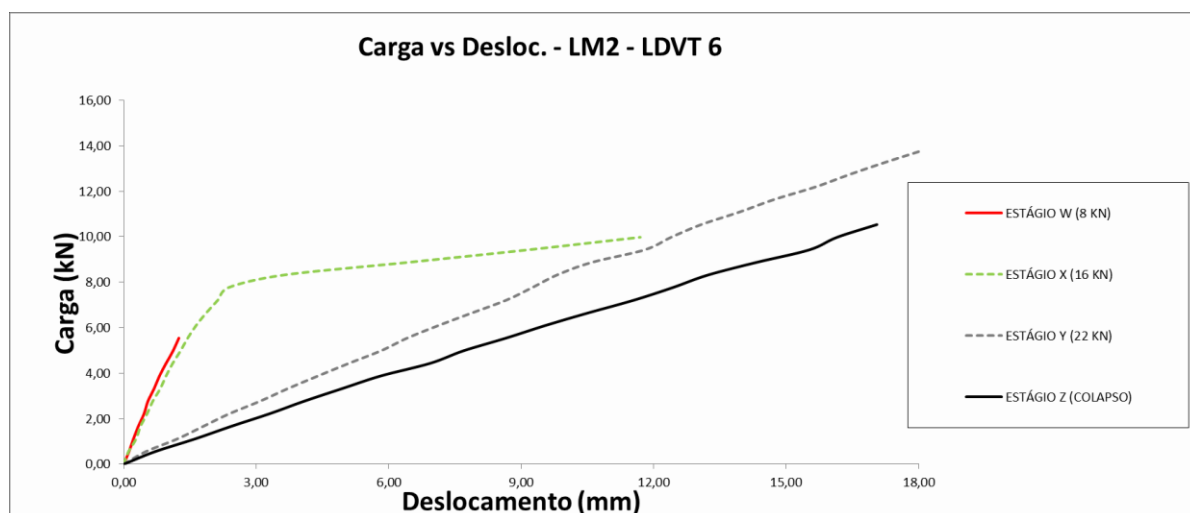


Figura 32 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje maciça 2

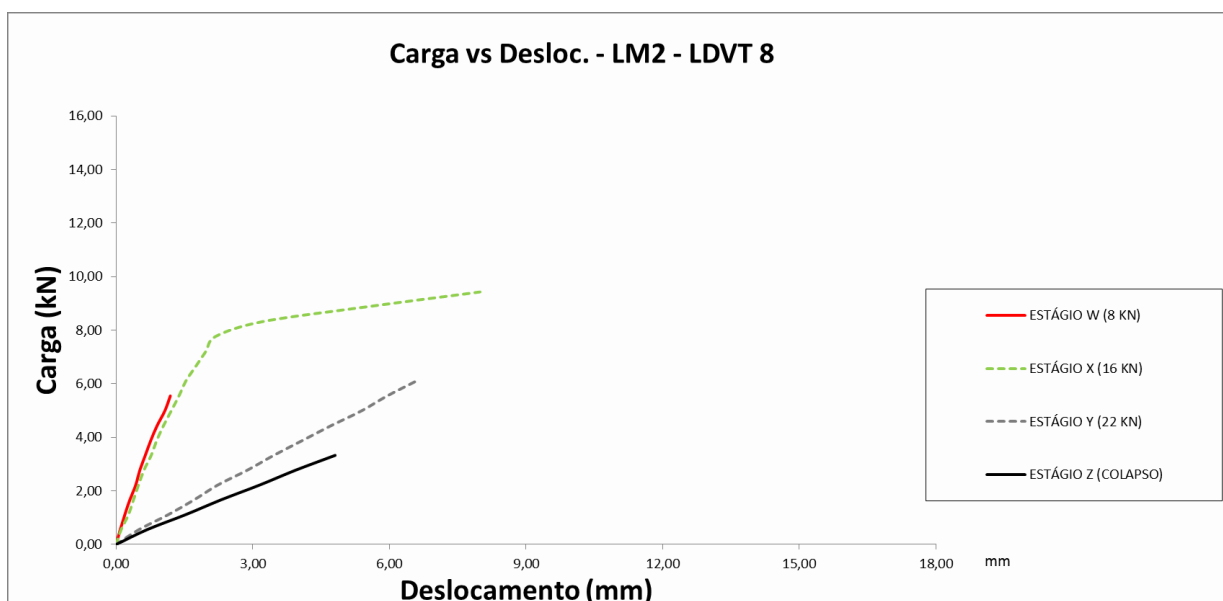


Figura 33- Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje maciça 2

É importante explicitar que a modificação na rigidez da estrutura, observada no comportamento das curvas para cada estágio de carga, corresponde ao efeito da aplicação da carga do estágio anterior. Por exemplo, para a curva da carga de 22kN (Estágio Y), é perceptível o efeito de degradação causado pela solicitação da carga de 16 kN (Estágio X).

Nota-se também que na curva de 16 kN muda bruscamente de inclinação, aumentando consideravelmente a deformação por fração de carga adicionada, nesta fase, a estrutura sai de seu regime elástico linear, perdendo consideravelmente sua rigidez.

Comparando os resultados entre as lajes, percebe-se que os gráficos laje 2 possuem as curvas de quatro estágios de carga (8kN, 16kN, 22kN e colapso), contra apenas três curvas nos gráficos da laje 1 (16kN, 22kN e colapso). Isso ocorreu devido a uma falha técnica da aplicação de carga na laje 1, em que foi aplicada uma carga desconhecida antes da aplicação da carga de 16kN.

Ao analisar a inclinação das curvas nos gráficos das lajes 1 em comparação com a laje 2, nota-se que a carga desconhecida aplicada inicialmente na primeira laje ultrapassou os 8kN e a estrutura deixou o regime elástico linear. Devido a esse fato, as curvas de 16kN possuem comportamentos diferentes entre as lajes. A laje maciça 1 foi submetida aos 16kN após ter saído do regime elástico linear na aplicação da carga

desconhecida, já a laje maciça 2 deixou de apresentar comportamento elástico linear durante a aplicação da carga de 16kN.

## 4.2. Testes estáticos nas lajes nervuradas

### a) Laje Nervurada 1

Para a laje nervurada 1, foram estabelecidos quatro estágios de carga, a saber: Estágios W (até 8 kN), X (até 16 kN), Y (até 22kN) e Z (até 30kN). Vale salientar que antes do início do ensaio propriamente dito a laje suportou o peso do sistema de perfis metálicos onde era aplicada a carga que foi de 1,27 kN. O colapso ocorreu aos 44kN.

As deflexões verificadas no elemento estrutural são apresentadas a seguir:

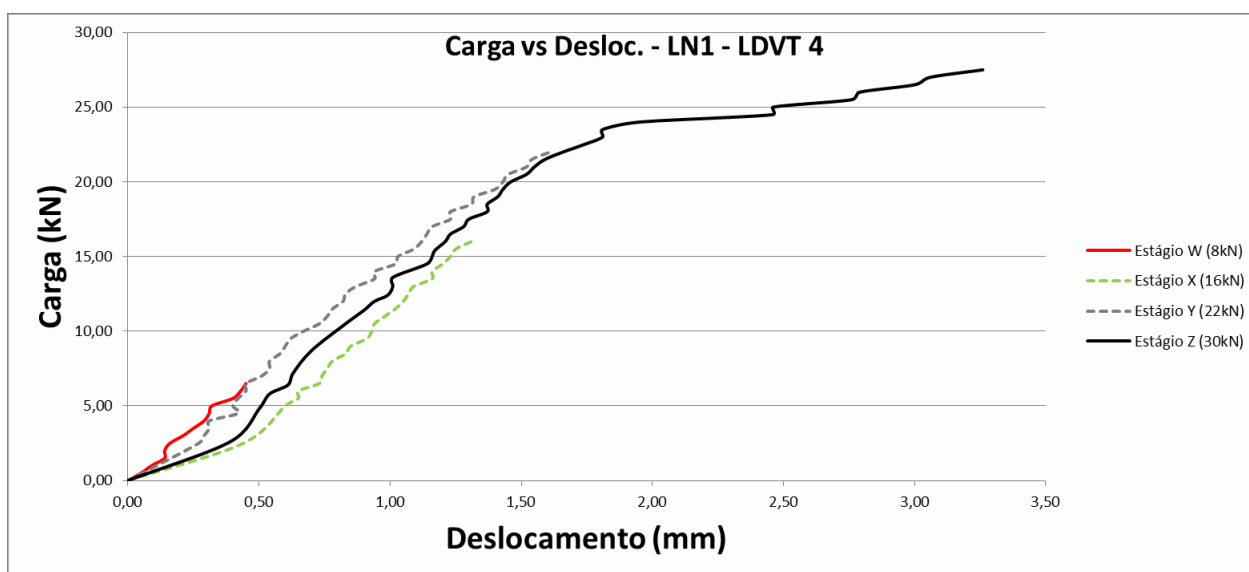


Figura 34 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje nervurada 1

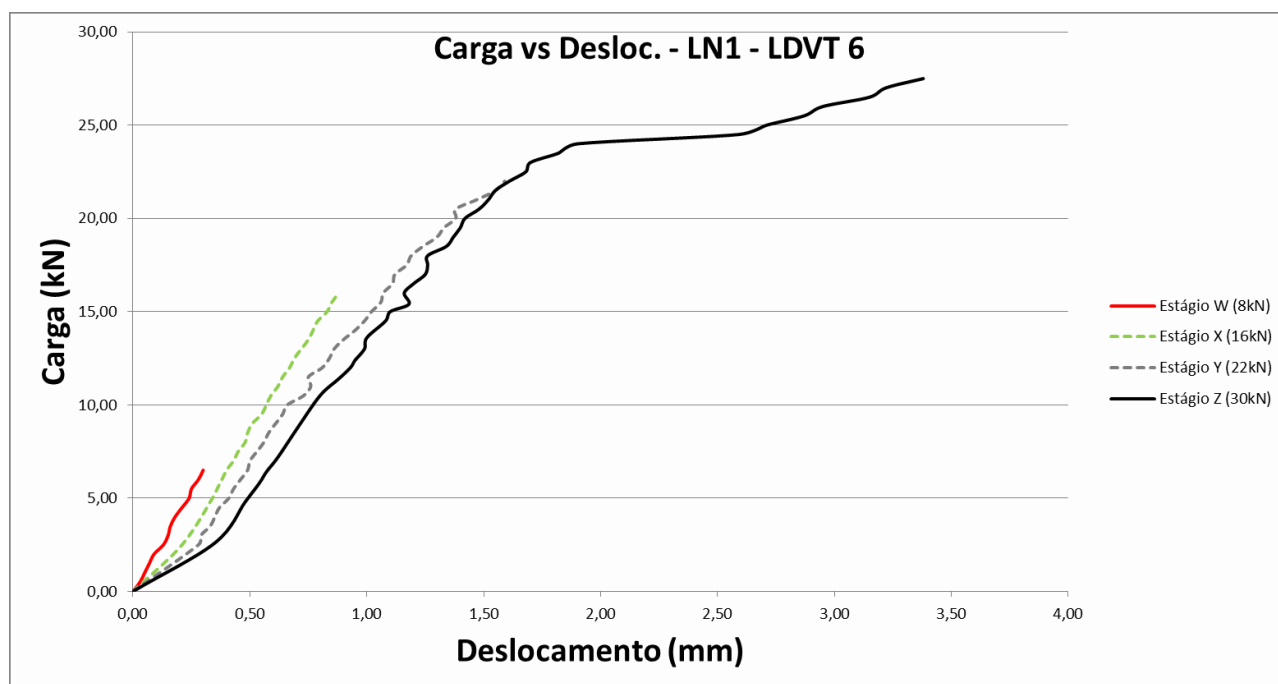


Figura 35 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje nervurada 1

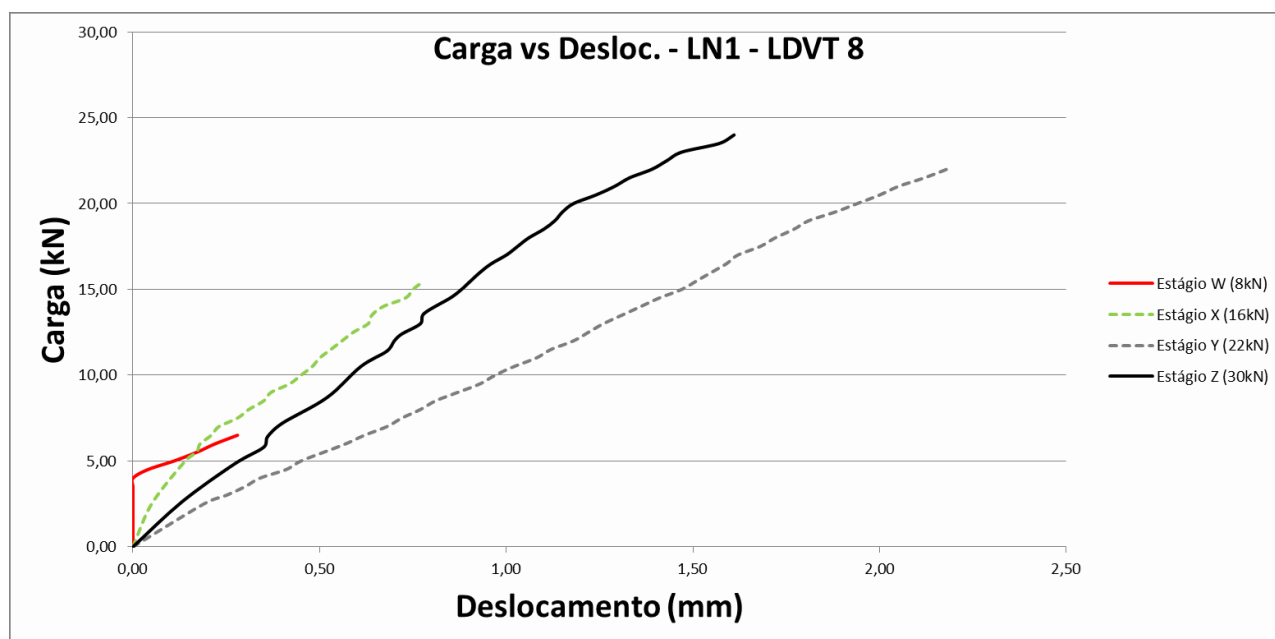


Figura 36 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje nervurada 2

### b) Laje Nervurada 2

Para a laje nervurada 2, também foram estabelecidos quatro estágios de carga, a saber: Estágios W (até 8 kN), X (até 16 kN), Y (até 22kN) e Z (até 28kN). O mesmo sistema de perfis metálicos foi utilizado e pesava 1,27 kN. O colapso ocorreu aos 45,3kN.

A seguir são apresentados as curvas de deflexão para a laje nervurada 2:

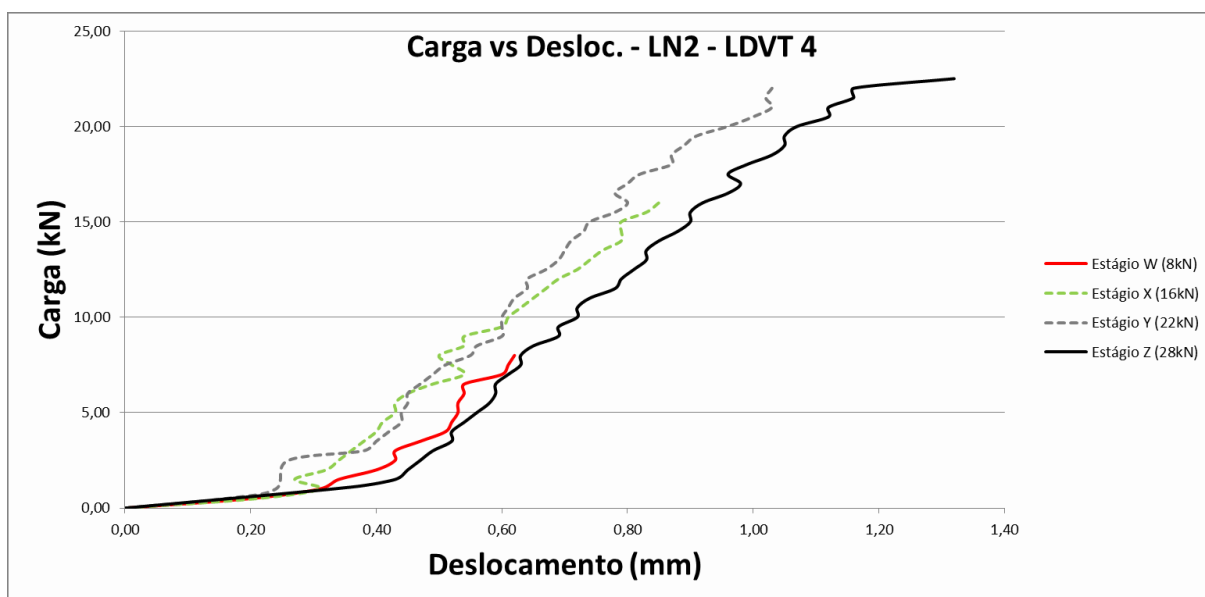


Figura 37 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 4 da laje nervurada 2

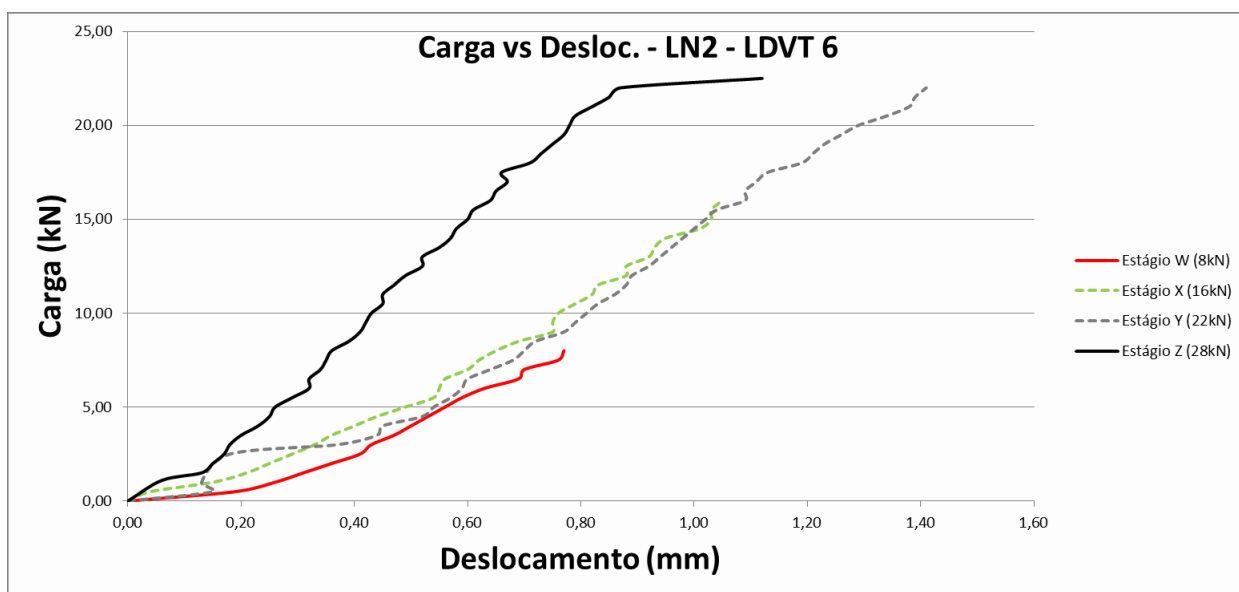


Figura 38 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 6 da laje nervurada 2

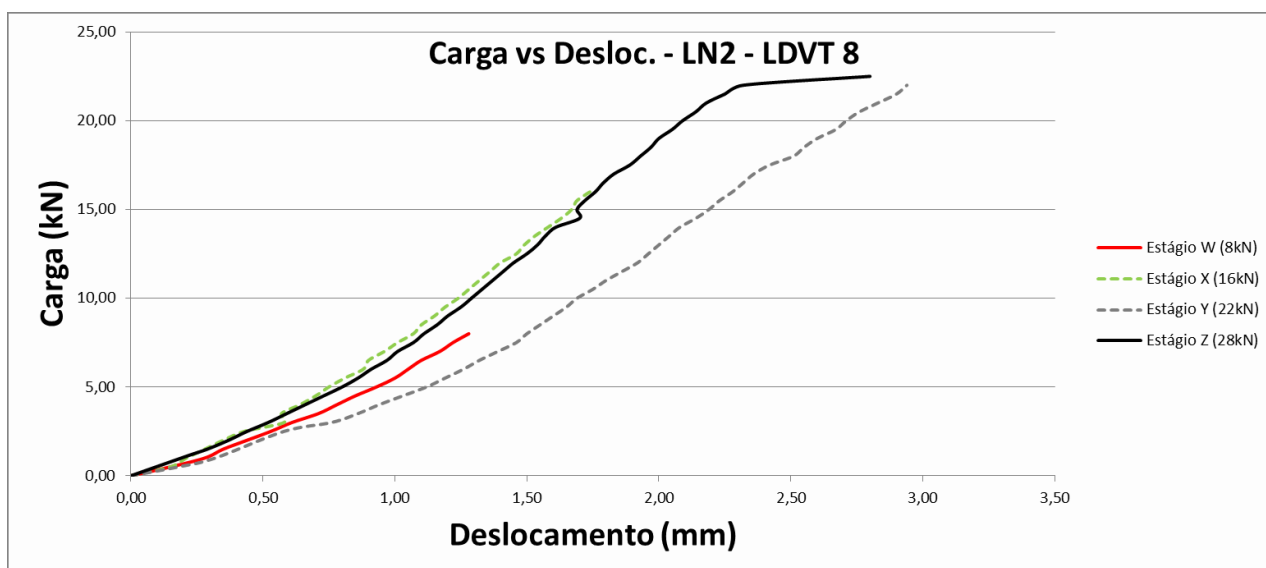


Figura 39 - Gráfico de carga VS deslocamento do LVDT 8 da laje nervurada 2

Ao analisar os gráficos tanto da laje nervurada 1 quanto da laje nervurada 2 em comparação com as lajes maciças, nota-se uma ordem de grandeza bem menor das deflexões sofridas pelas lajes nervuradas, que se deve ao fato dessas possuírem maior rigidez, consequência da própria concepção das lajes nervuradas. Em decorrência das deflexões menores, os gráficos sofrem maior influência de reacomodações dos LVDT's sob as lajes, fazendo as curvas apresentarem alguns sinais de inconformidades, porém apresentado comportamento geral coerente com os ensaios.

Diferentemente das lajes maciças, as curvas das nervuradas mudam bruscamente de inclinação apenas após os 22kN, o que representa perda considerável da rigidez e possível saída do regime linear.

Em alguns dos gráficos pode-se perceber a perda de rigidez decorrente do efeito da aplicação da carga do estágio anterior. Esse aspecto não ficou claro em todos os gráficos devido a elevada rigidez das lajes nervuradas, em que baixos estágios de carregamento não surtiram tanto efeito quanto os aplicados nas maciças.

### 4.3. Testes dinâmicos nas lajes maciças

#### 4.3.1. Testes de Linearidade e Reciprocidade

No que diz respeito ao processamento dos testes modais, foram feitas as análises dos testes de linearidade e reciprocidade das lajes maciças. Como já citado no item 3.2.1.2. o teste de linearidade consiste na aplicação de cargas de impacto com diferentes intensidades no mesmo nó e no de reciprocidade avaliam-se as FRF's obtidas em pontos

distintos, pela inversão da posição entre ponto de excitação e ponto de resposta. Os resultados dos testes de reciprocidade estão nas Figuras 59 à 65. Já os de linearidade nas Figuras 66 à 72.

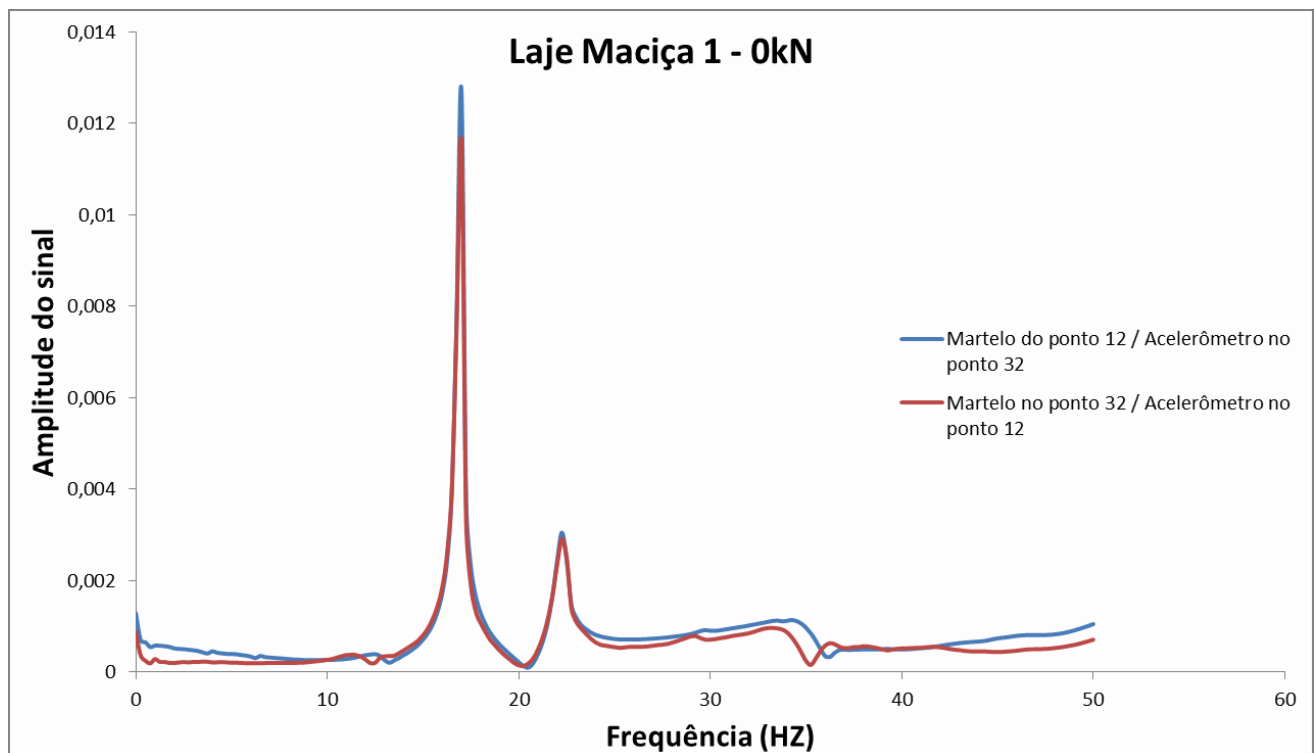


Figura 40 – Reciprocidade entre excitação no ponto 32 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 32, para laje maciça 1 – 0kN.

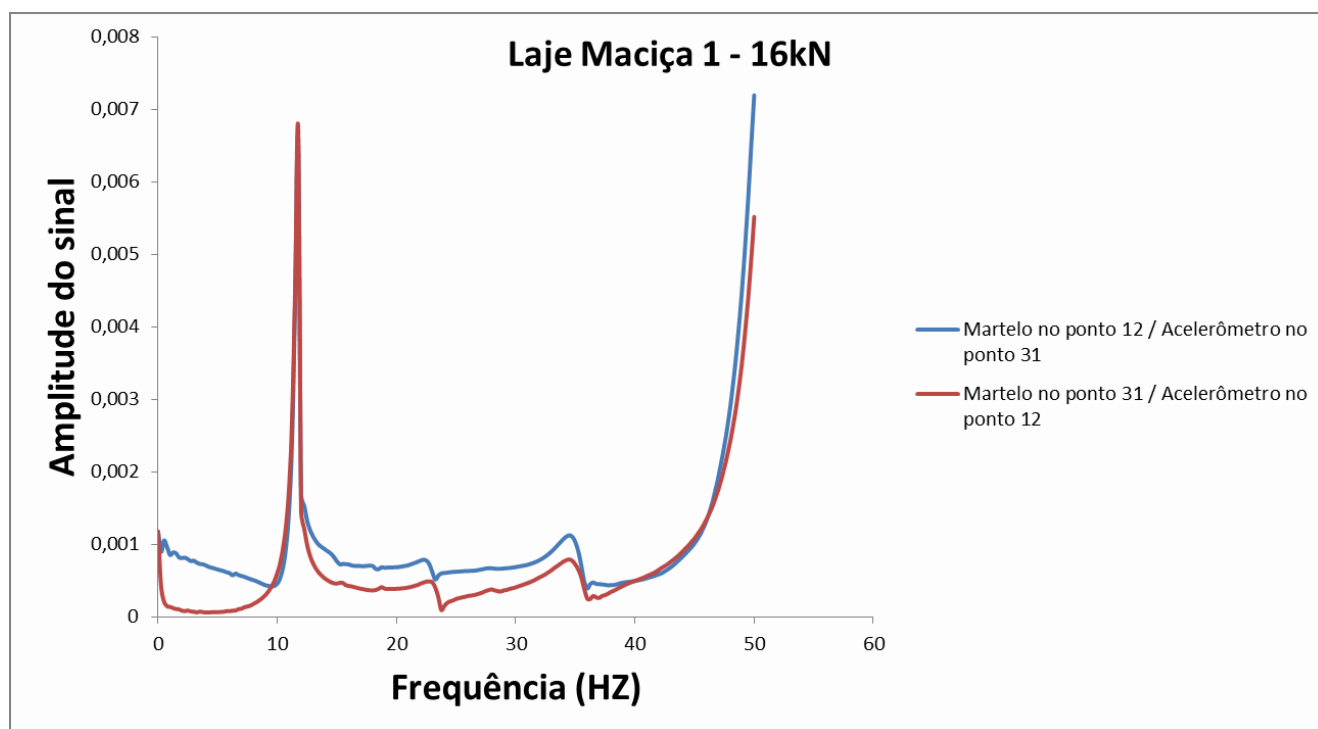


Figura 41 - Reciprocidade entre excitação no ponto 31 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 31, para laje maciça 1 – 16kN.

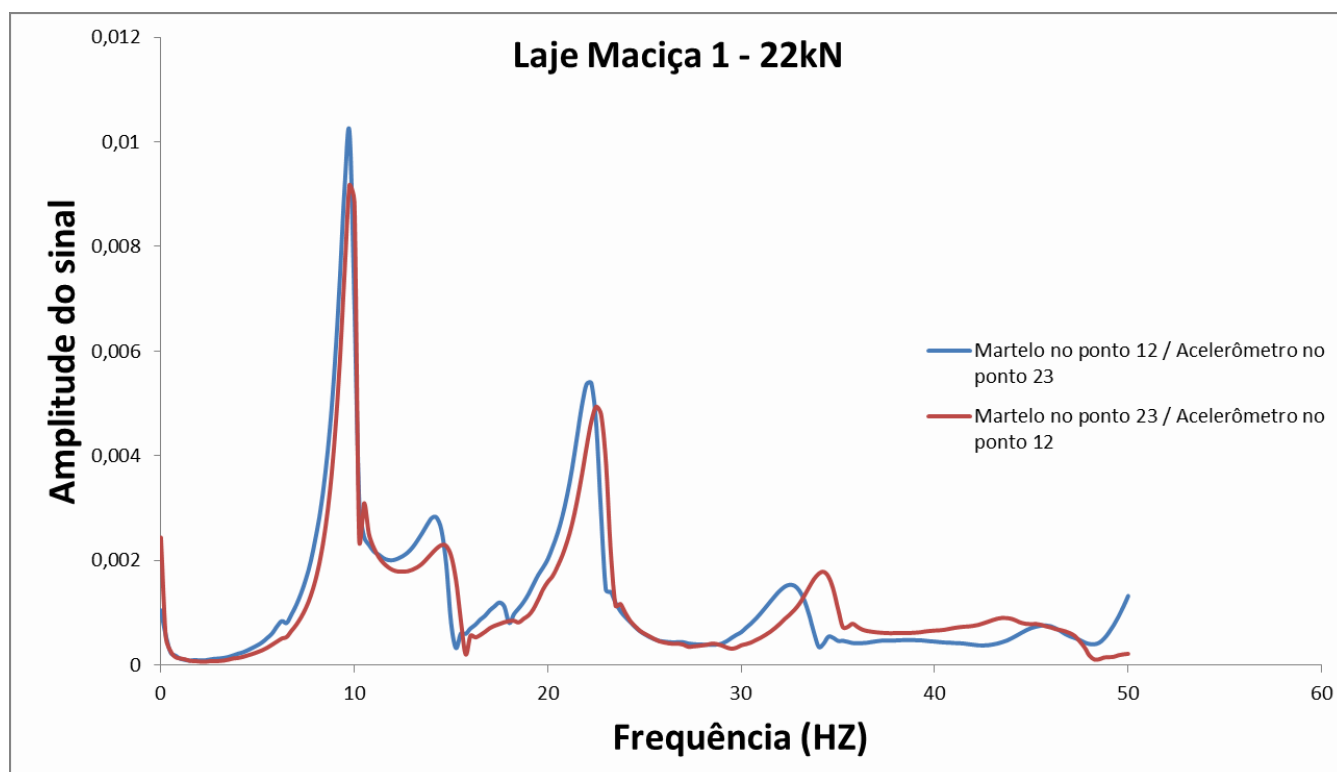


Figura 42- Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje maciça 1 – 22kN.



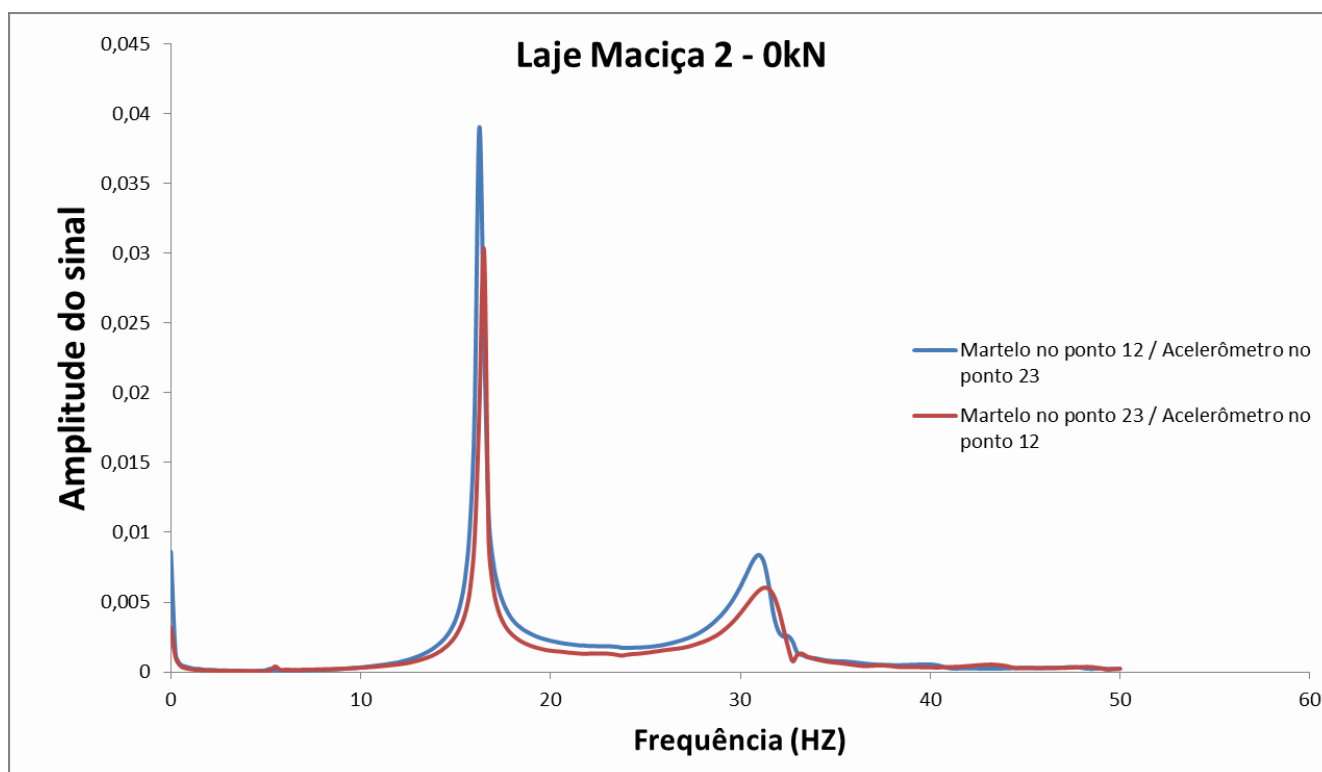


Figura 43 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje maciça 2 – 0kN.

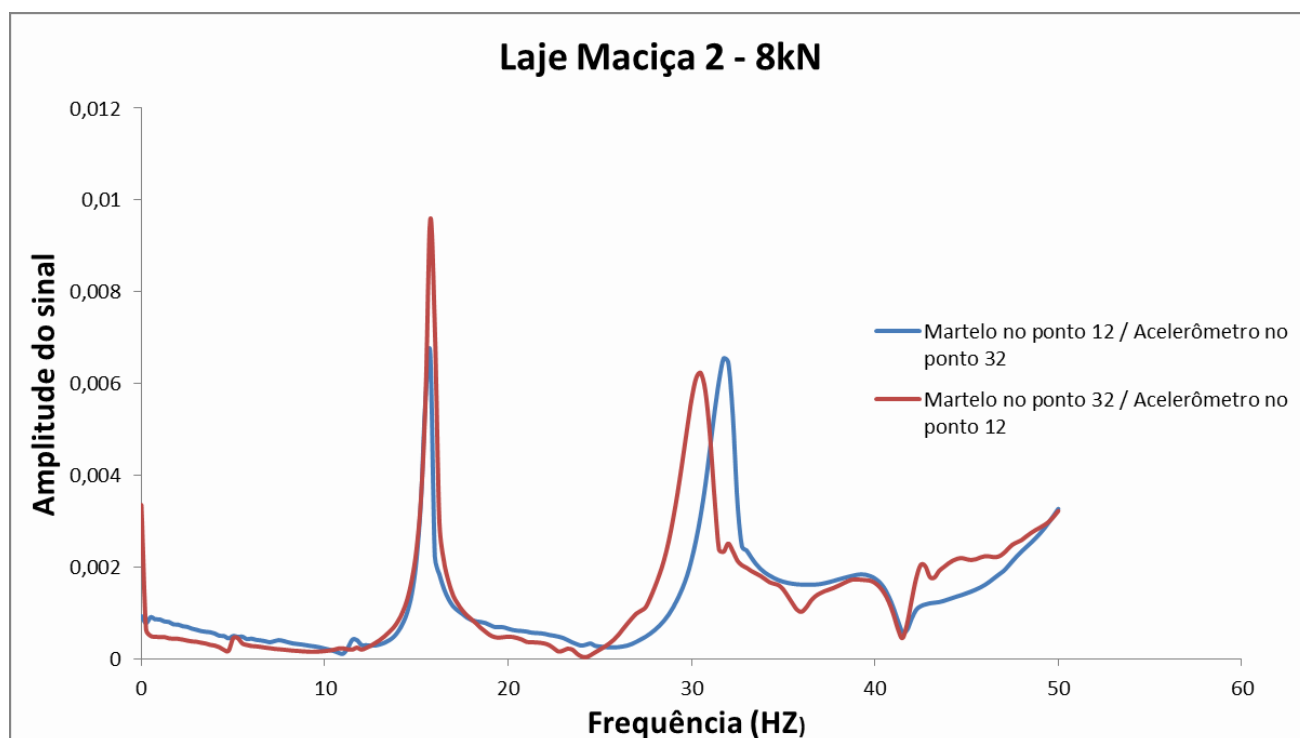


Figura 44 - Reciprocidade entre excitação no ponto 31 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 31, para laje maciça 2 – 8kN.

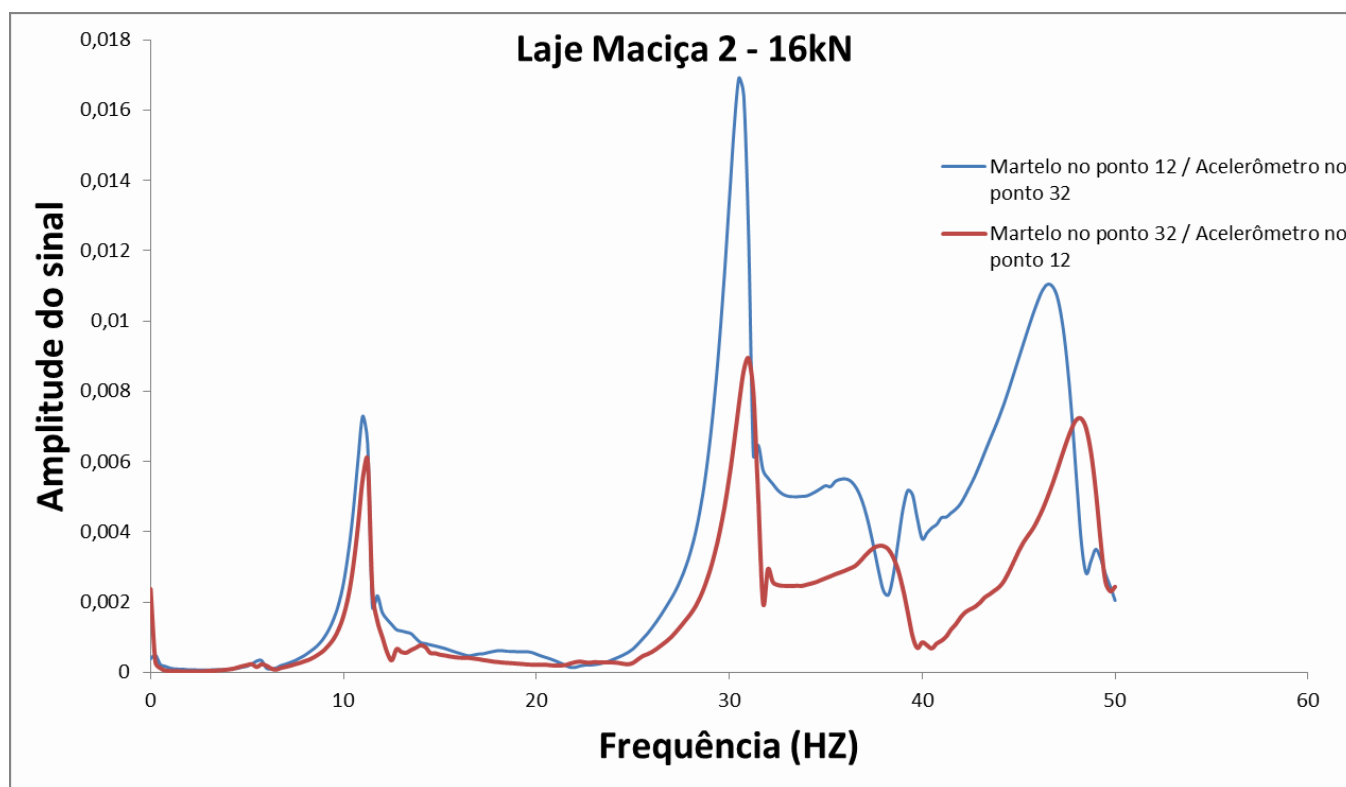


Figura 45 - Reciprocidade entre excitação no ponto 32 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 32, para laje maciça 2 – 16kN.

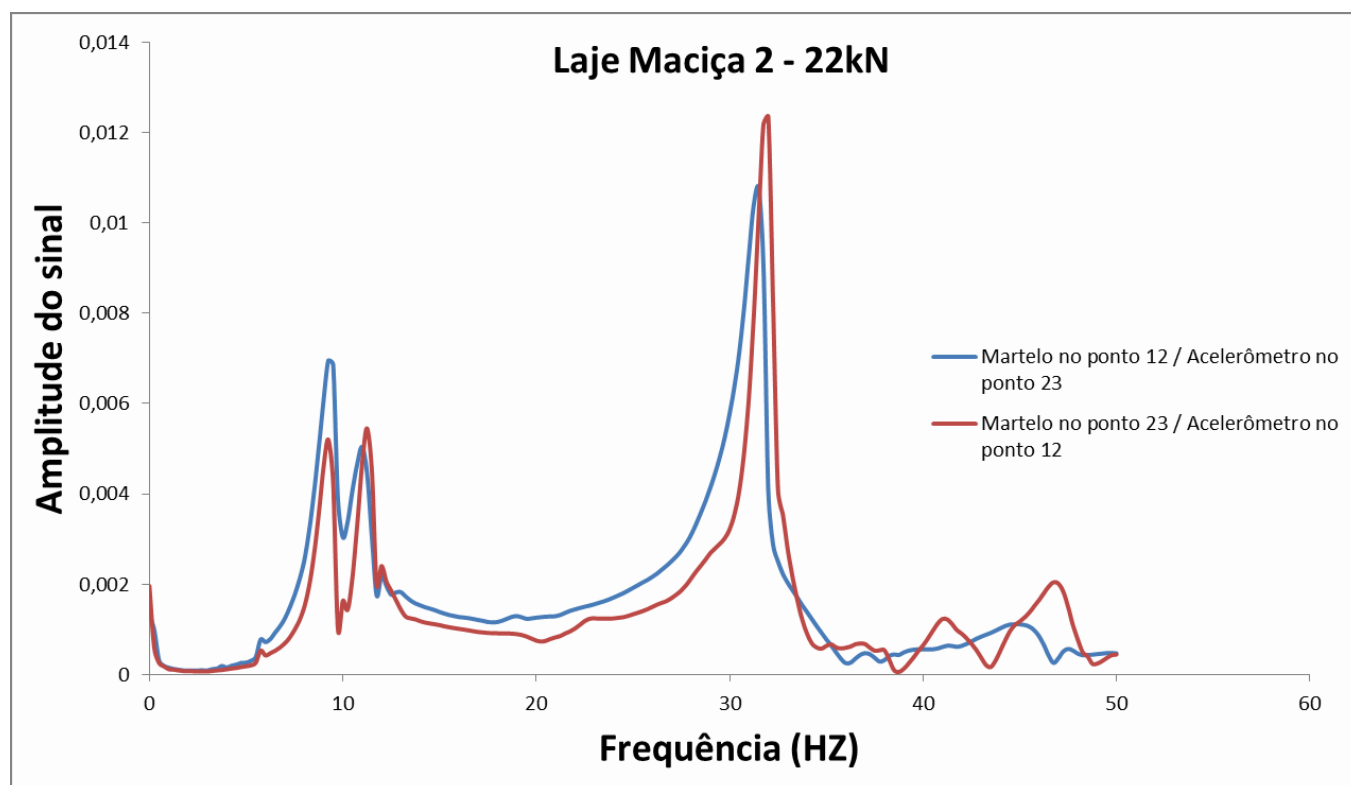


Figura 46 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje maciça 2 – 22kN.

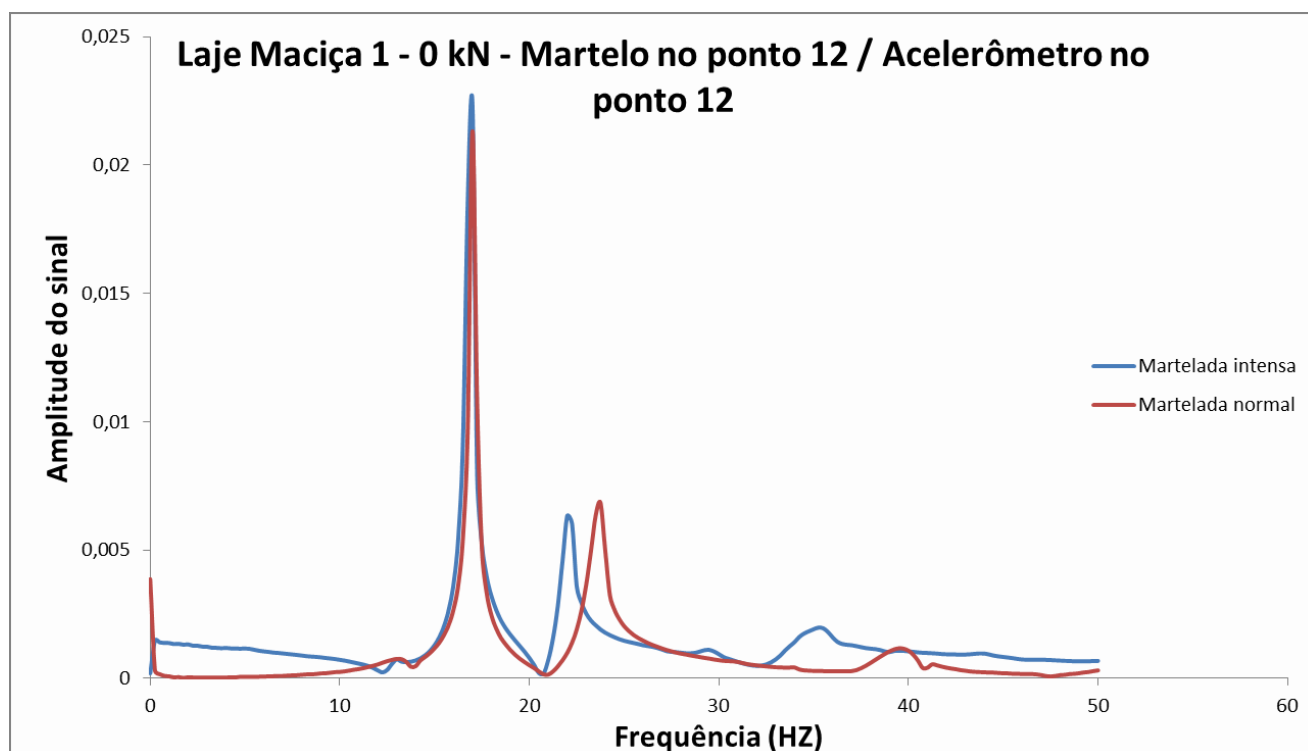


Figura 47 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 1 – 0kN.

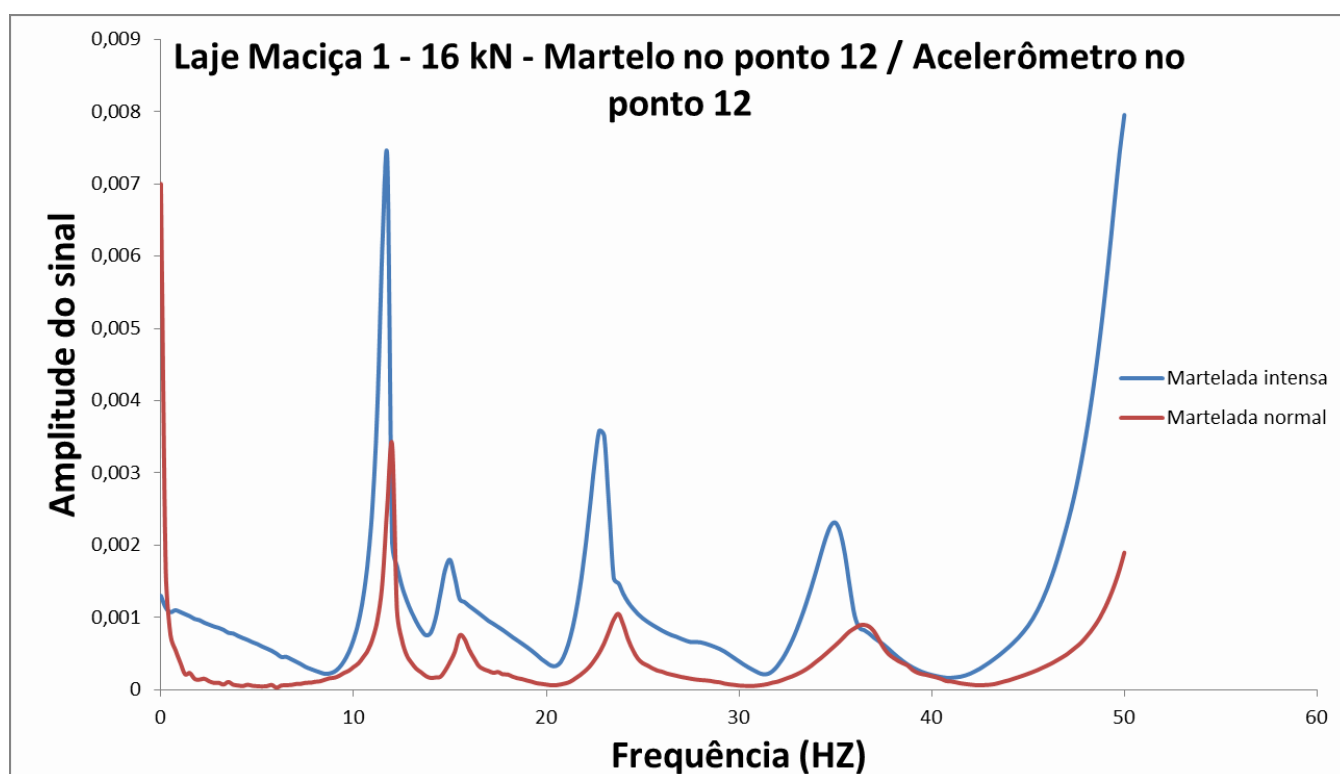


Figura 48 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 1 – 16kN.

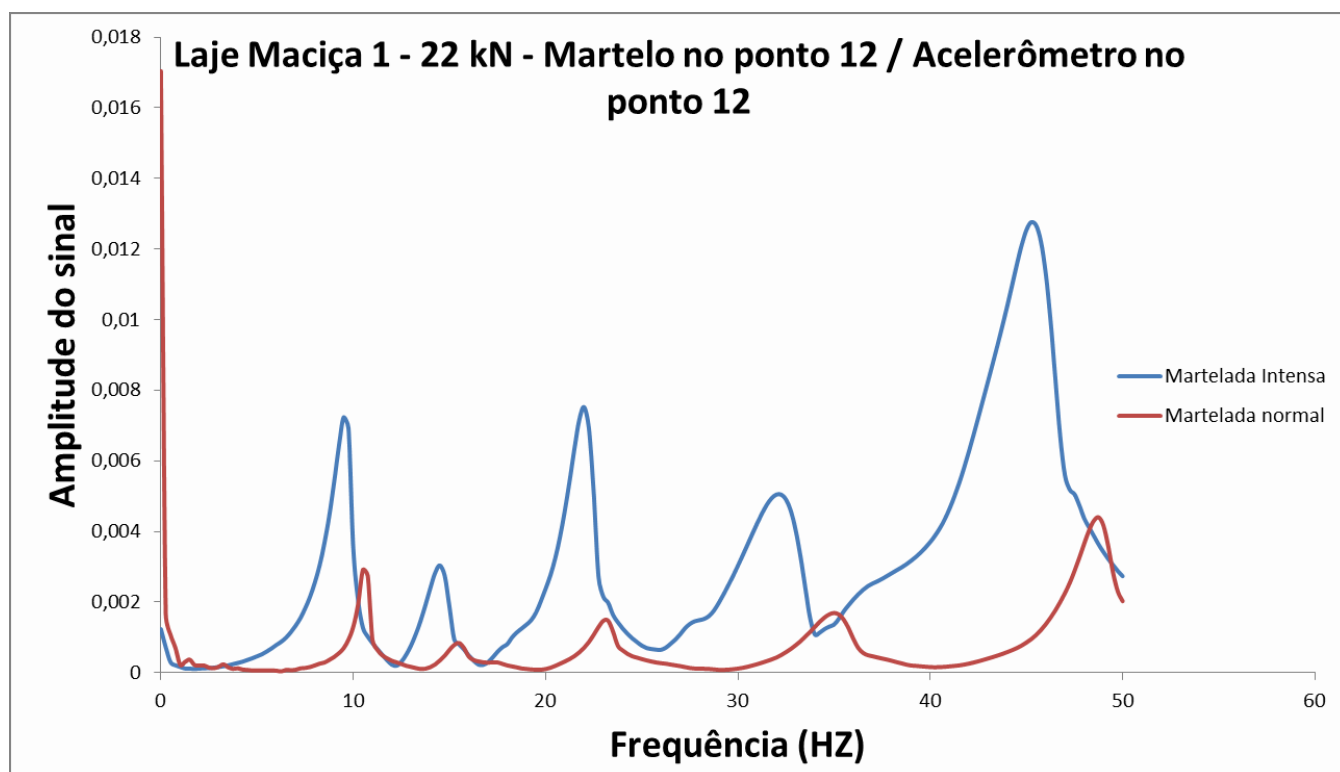


Figura 49 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 1 – 22kN.

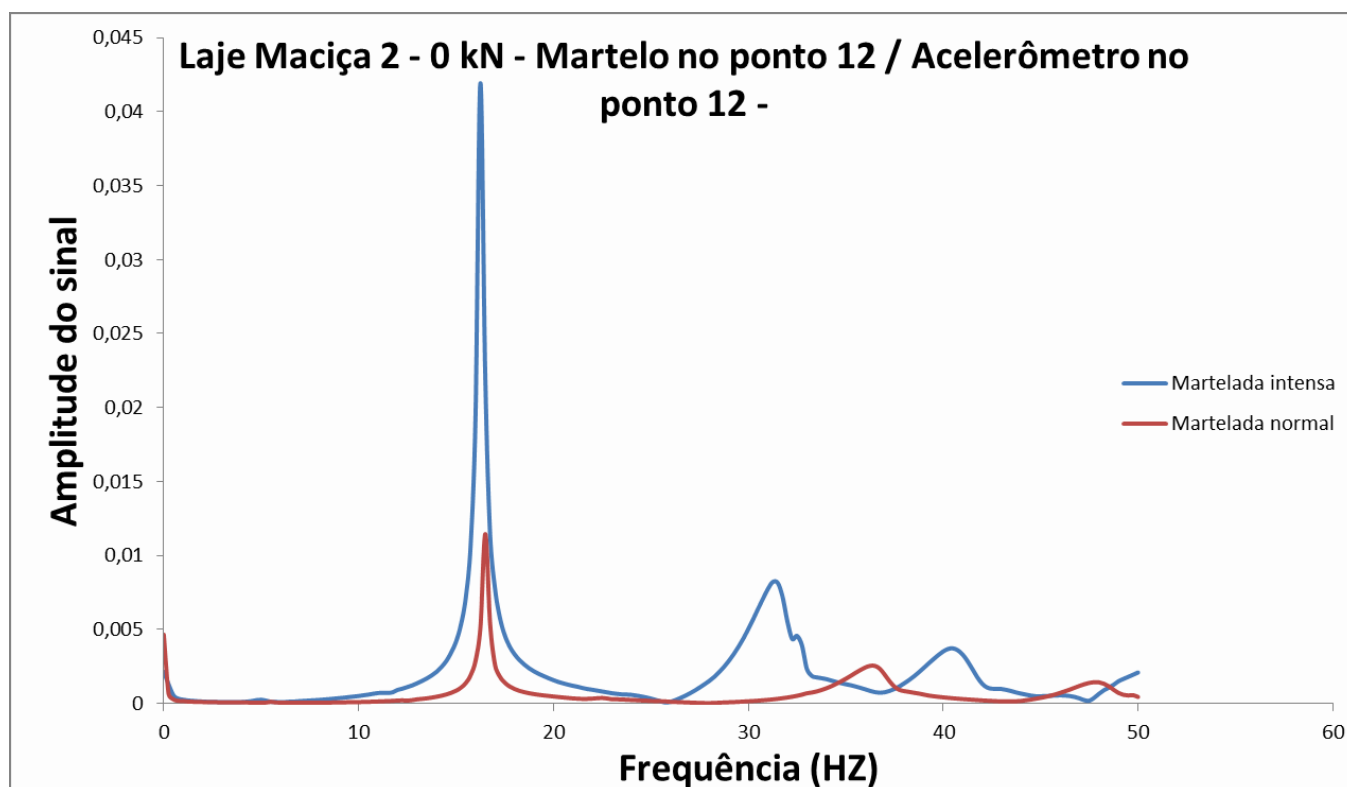


Figura 50 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 0kN.

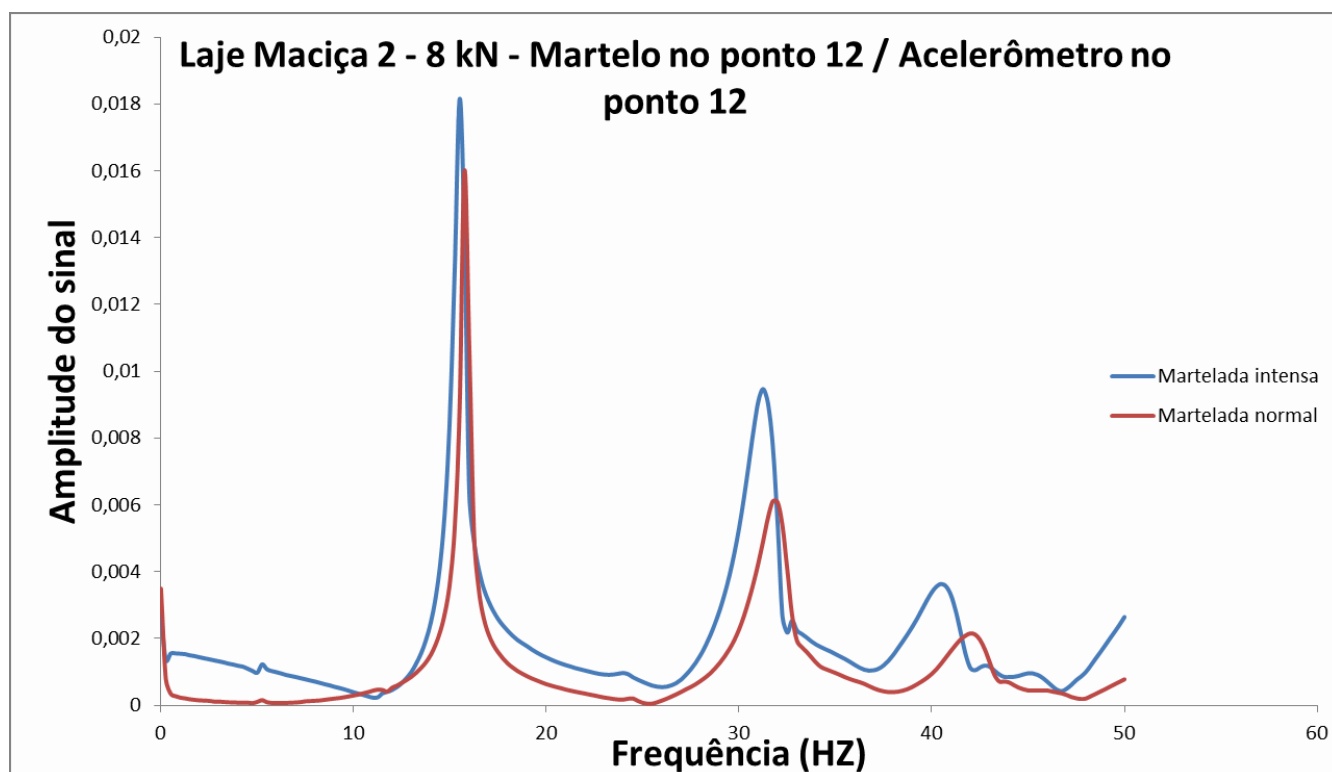


Figura 51 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 8kN.

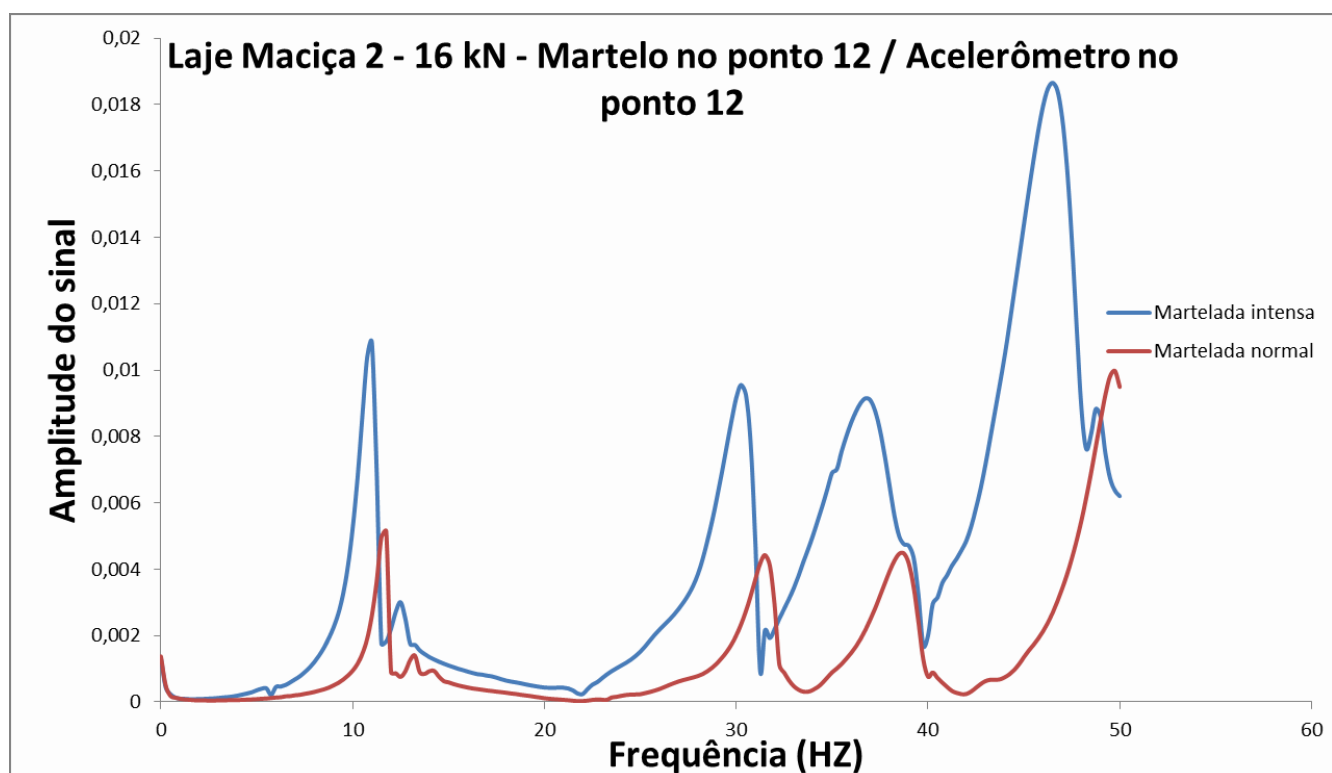


Figura 52 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 16kN.

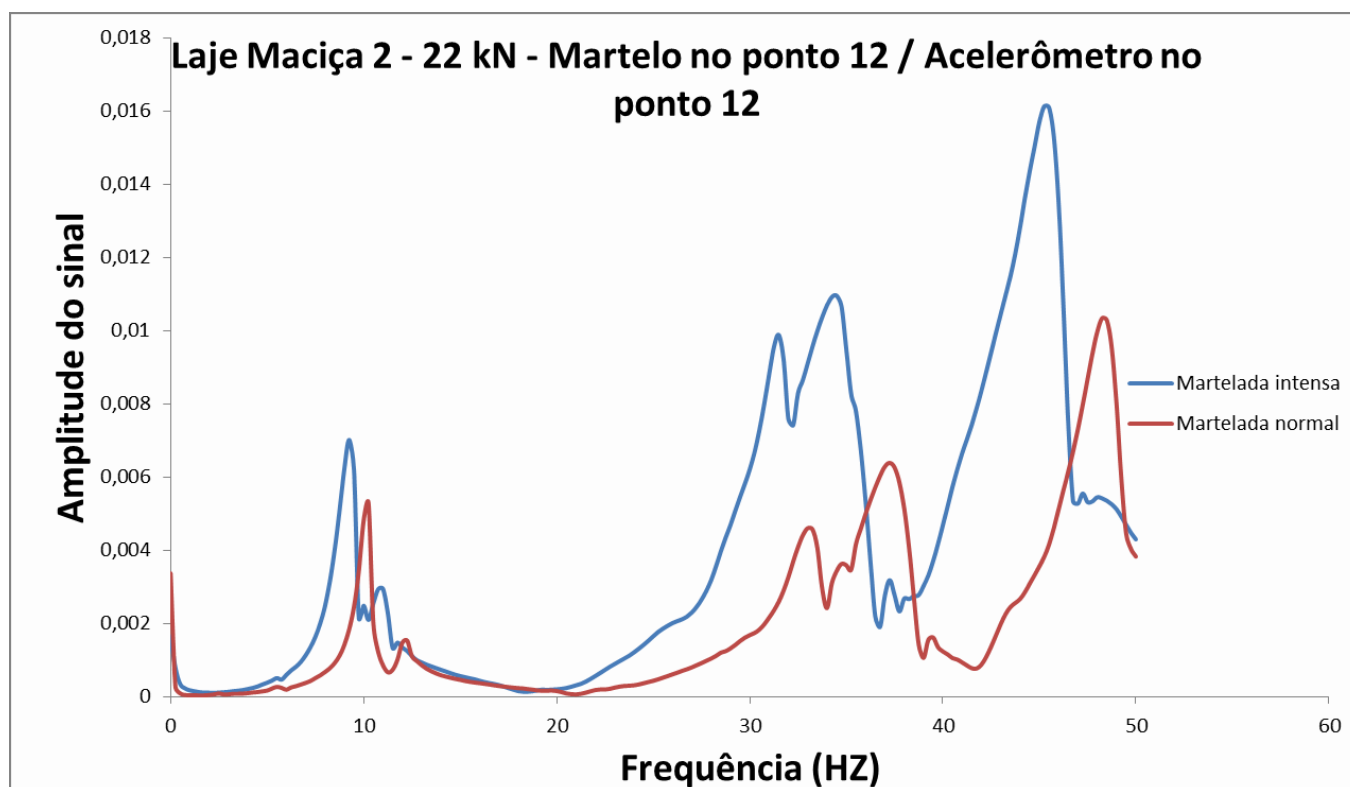


Figura 53 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje maciça 2 – 22kN.

Tanto nos resultados de reciprocidade quanto nos de linearidade percebe-se um gradual distanciamento entre as FRF's de martelada normal e martelada intensa a medida que aumenta o estágio de fissuração das lajes. Nos testes de linearidade, os espectros das marteladas intensas apresentam sinais com maiores amplitudes e frequências naturais ligeiramente menores quando comparados aos espectros da martelada normal. Tais resultados podem ser decorrentes dos estágios de fissuração pelos quais as lajes foram submetidas, haja vista que essas características não foram observadas para as lajes sãs, o que pode ser um indicador de que as mesmas saíram do regime linear ao longo da aplicação de carga.

#### 4.3.2 Parâmetros modais pelo método do decaimento

Os resultados de frequência e amortecimento pelo método do decaimento foram obtidos para as duas lajes maciças.

A partir da plotagem dos espectros de todos os pontos da malha de cada laje, para cada estágio de carga (0 kN, 8 kN, 16 kN e 22 kN), foram definidos aqueles nos quais seria possível extrair modos utilizando o método do decaimento. Buscaram-se

pontos em que cada modo estava isolado dos demais. A Figura 40 ilustra o espectro de um ponto na laje maciça sã;

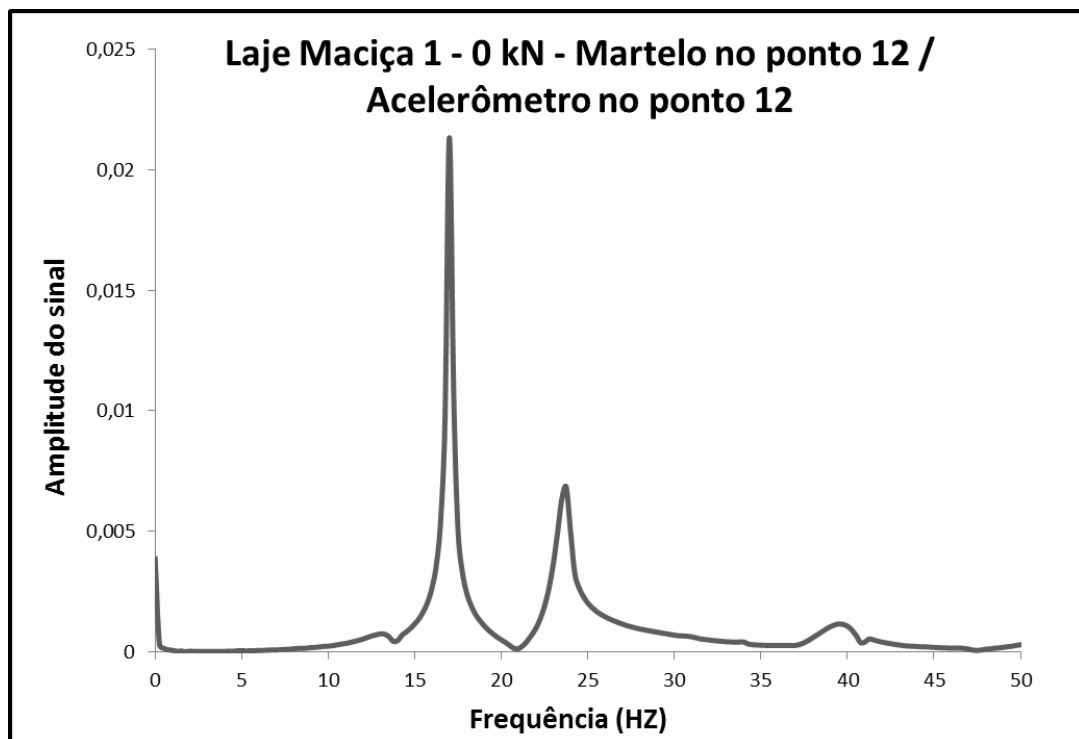


Figura 54 - Espectro do ponto de referência (ponto12) na laje maciça 1.

Com base nos pontos definidos, a etapa seguinte é a filtragem do sinal. O analisador de espectro salva os dados em dois formatos: ASCII e UFF, que são dois formatos bem difundidos nos programas de processamento de testes modais. A filtragem foi realizada no software Matlab. Uma vez que o código é compilado, o programa exibe o espectro do modo, cabendo ao operador escolher o intervalo mais adequado para isolar cada modo.

Uma vez escolhido o intervalo, o Matlab realiza a filtragem do sinal no domínio da frequência, tendo como dados de saída o sinal filtrado no domínio do tempo. Os dados eram fornecidos em uma Tabela, sendo transformados em gráficos. A Figura 41 ilustra o gráfico dos dados de saída.

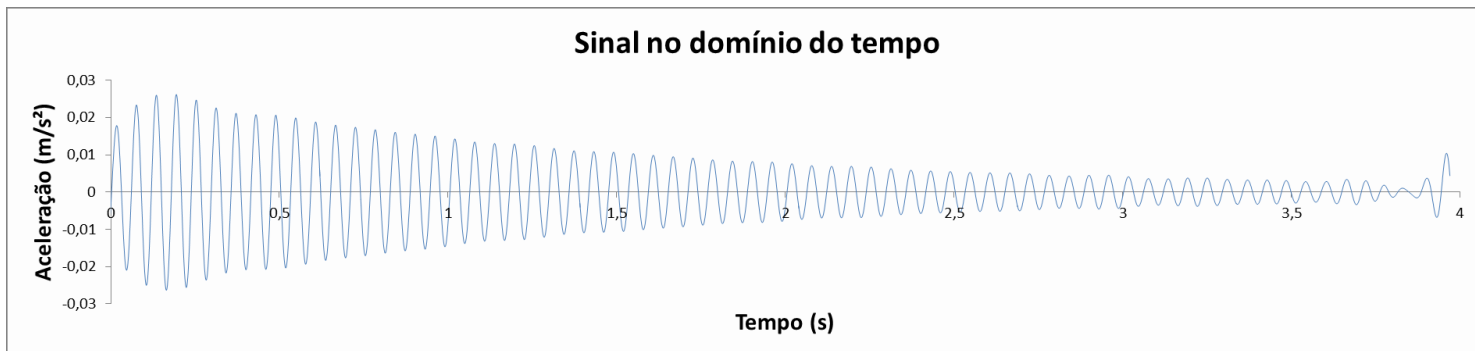


Figura 55 - Sinal no domínio do tempo do ponto de referência (ponto 12) após filtragem para isolar o primeiro modo de vibração.

Com o sinal filtrado, obteve-se o amortecimento e a frequência média. Para obtenção do amortecimento, era indispensável que o sinal no domínio do tempo tivesse decaimento exponencial, o que é característico de um modelo de amortecimento viscoso, adotado no processamento.

A princípio definiu-se, no gráfico do sinal no domínio do tempo, o período em que se inicia o decaimento exponencial. A partir de então todos os valores dos picos de cada período foram extraídos e plotou-se o gráfico número do pico vs  $\ln(\text{pico})$ , onde  $\ln$  é o logaritmo natural. O amortecimento era então obtido pela Equação 3:

$$\xi = (\text{Inclinação da curva} / (2 \cdot \pi)) \cdot (-1) \quad (3)$$

Para obtenção das frequências médias, interpolaram-se os valores para os quais a curva cortava o eixo dos tempos de modo a ter maior precisão na determinação do período do sinal. Pela subtração dos tempos sucessores pelos anteriores, tinha-se o período, cujo inverso era a frequência. Buscou-se obter, no mínimo, três valores de frequência e amortecimento para cada modo. A partir dos valores de frequência e amortecimento dos pontos selecionados, estes foram organizados de forma a se obter uma Tabela com os valores médios. Estes estão exibidos nas Tabelas 4 a 15.



NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	26	0,008	0,007	0,001	16,875	16,960	0,061
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	14	0,007			16,900		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,007			17,032		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	8	0,006			16,988		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	2	0,006			17,004		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 4 — Primeiro modo da laje maciça 1 com 0 kN

MODO 2							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	26	0,010	0,013	0,002	22,108	22,855	0,618
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	14	0,013			22,252		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,014			23,559		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	8	0,014			22,803		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	2	0,014			23,553		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 5— Segundo modo da laje maciça 1 com 0 kN

MODO 1							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	9	0,013	0,013	0,000	11,814	11,738	0,055
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	14	0,014			11,686		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	15	0,013			11,716		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 6 – Primeiro modo da laje maciça 1 com 16 kN

MODO 2							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	7	0,019	0,023	0,003	14,620	14,491	0,374
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	15	0,024			14,872		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	1	0,026			13,983		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 7 – Segundo modo da laje maciça 1 com 16 kN

MODO 3							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD. (FREQ)
MARTELO	14	0,018	0,019	0,001	23,092	23,289	0,250
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	15	0,017			23,261		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	20	0,020			23,098		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,021			23,705		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 8 – Terceiro modo da laje maciça 1 com 16 kN

MODO 4							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD. (FREQ)
MARTELO	12	0,025	0,024	0,002	37,190	35,509	0,982
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	14	0,025			34,708		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	15	0,023			35,102		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	19	0,021			35,038		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 9 – Quarto modo da laje maciça 1 com 16 kN

MODO 1							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	6	0,010	0,014	0,003	10,729	10,468	0,276
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	8	0,013			10,591		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12 (INT)	0,020			9,943		
ACELERÔMETRO	12 (INT)						
MARTELO	14	0,016			10,459		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	7	0,012			10,620		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 10 – Primeiro modo da laje maciça 1 com 22 kN

MODO 2							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	8	0,024	0,028	0,004	15,831	15,529	0,499
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12 (INT)	0,028			14,725		
ACELERÔMETRO	12 (INT)						
MARTELO	14	0,034			16,036		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	32	0,027			15,522		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 11 - Segundo modo da laje maciça 1 com 22 kN

MODO 3							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	8	0,020	0,020	0,000	23,062	22,838	0,355
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12 (INT)	0,020			22,337		
ACELERÔMETRO	12 (INT)						
MARTELO	14	0,021			23,114		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 12 – Terceiro modo da laje maciça 1 com 22KN

MODO 4							
NÓ		$\xi$	$\xi$ MÉDIO	DESVIO PAD. ( $\xi$ )	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	6	0,021	0,021	0,002	35,767	34,408	1,095
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	8	0,021			34,616		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12 (INT)	0,023			32,708		
ACELERÔMETRO	12 (INT)						
MARTELO	14	0,017			34,542		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 13 – Quarto modo da laje maciça 1 com 22KN

LAJE MACIÇA2 - 0KN							
MODO 1							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	8	0,007	0,007	0,001	16,454	16,447	0,080
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,006			16,550		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	13	0,008			16,459		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	22	0,007			16,326		
ACELERÔMETRO	22						

Tabela 14 – Primeiro modo da laje maciça 2 com 0K

LAJE MACIÇA 2 - 8KN								
MODO 1								
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.	
MARTELO	1	0,007	0,010	0,003	15,939	15,800	0,088	
ACELERÔMETRO	12							
MARTELO	8	0,009			15,796			
ACELERÔMETRO	12							
MARTELO	9	0,008			15,768			
ACELERÔMETRO	12							
MARTELO	22	0,014						15,697
ACELERÔMETRO	22							

Tabela 15 – Primeiro modo da laje maciça 2 com 8KN

Nem todos os modos são possíveis de serem isolados para obtenção dos parâmetros modais pelo método do decaimento, fazendo-se necessária a utilização do StarModal. Nota-se uma queda nítida nas frequências naturais à medida que se introduziu carga no sistema, devido à perda de rigidez da estrutura induzida pelo estado de fissuração da laje (Figura 43). O amortecimento de cada modo também teve seu valor aumentado (Figura 42). Tais fatos eram esperados pois, à medida que a laje fissura, há mais locais onde a energia do impacto pode ser dissipada, o que justifica o aumento no amortecimento e potencial alteração nos modos, pois a laje fissurada pode vibrar de formas diferentes. Outras observações importantes dizem respeito à segunda laje. Primeiramente, o espectro em certos pontos tinha modos cujo pico variava de acordo com o nó, o que era um sinal de dois modos próximos, e cuja obtenção só seria possível através do software StarModal. Outra observação importante é que, a partir da carga estática de 16 kN, não foi mais possível isolar os modos, sendo que o processamento passou a ser unicamente utilizando o StarModal. Outro fato observado em ambas as lajes foi a existência de modos observáveis apenas em alguns pontos específicos. Uma possível justificativa para isso é que o ponto de referência escolhido (nó12) é próximo a um nó de um desses modos, de forma que tal modo não é visível quando a resposta é captada nele. Por fim, foi também observado a existência de modos que só apareciam nas bordas da laje, o que é um indicativo de que os mesmos são modos torcionais, pois os mesmos são mais sensíveis à alteração nas condições de apoio.

As Figuras 42 e 43 mostram a variação do amortecimento e frequência à medida que a laje maciça 1 foi sendo submetida aos estágios de carga. Como já mencionado, a laje maciça 2 mostrou modos muito próximos em alguns pontos, impossibilitando a elaboração dos gráficos apenas com os resultados obtidos pelo método do decaimento.

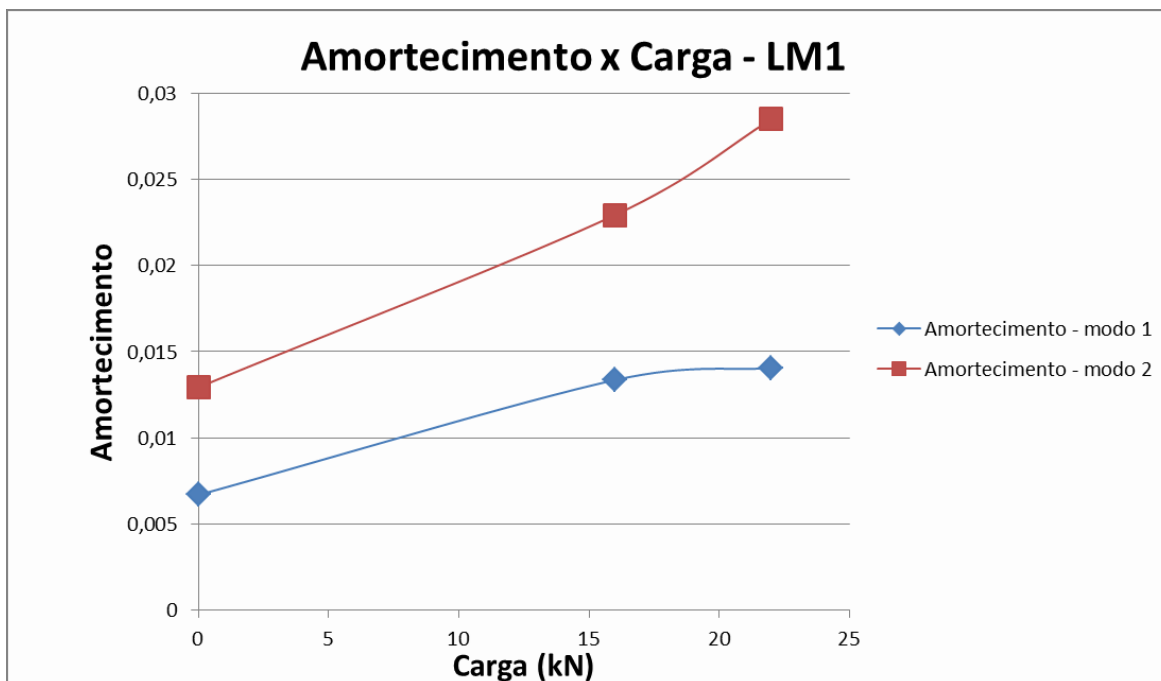


Figura 56 – Variação do amortecimento obtido pelo decaimento com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga.

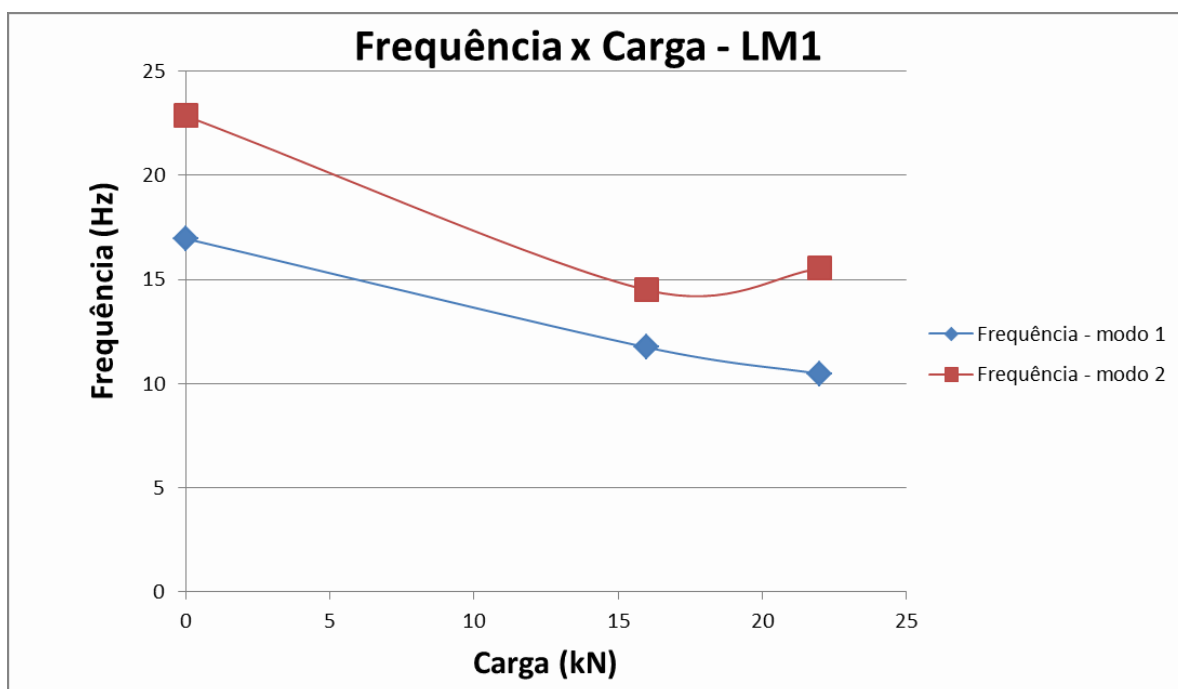


Figura 57 – Variação da frequência obtida pelo decaimento com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga.

### 433. Parâmetros modais utilizando-se o StarModal

Utilizou-se o StarModal para obtenção dos modos e para o processamento considerando vários modos, bem como para os casos em que a FRF apresentou modos muito próximos, impossíveis de serem isolados para aplicação do método do decaimento.

No que tange o processamento propriamente dito, os intervalos para obtenção dos modos foram escolhidos por tentativa e erro. A Figura 44 ilustra um espectro visto no StarModal e a Figura 45 mostra um modo de vibração de acordo com as coordenadas fornecidas pelo software.

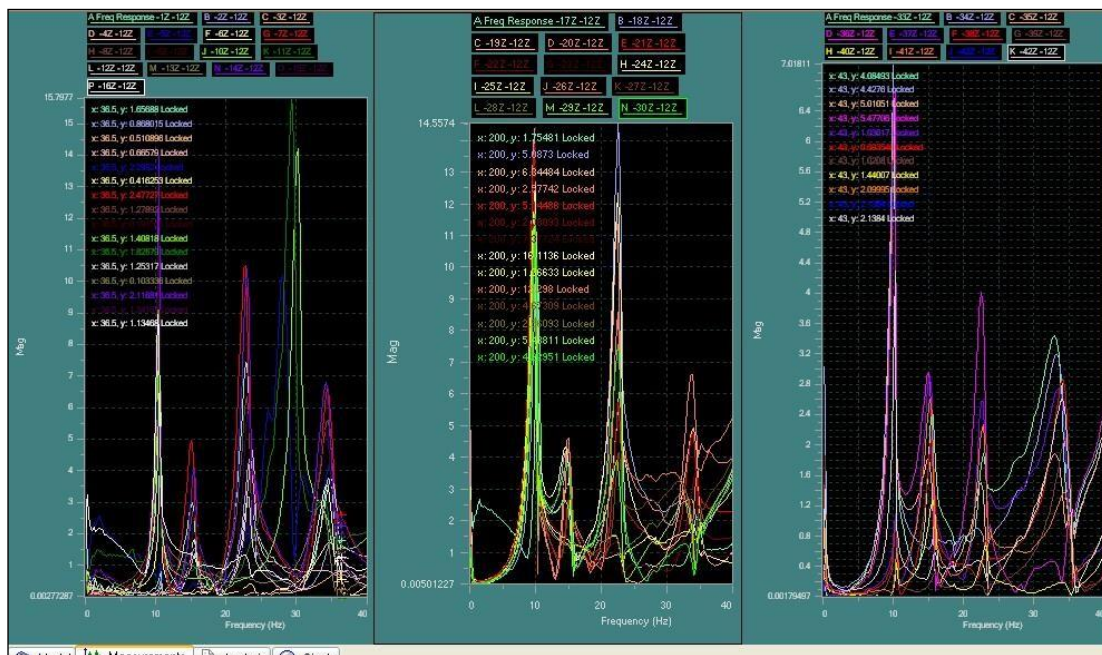


Figura 58 – Espectro no StarModal da laje maciça 1 para a carga de 22 KN

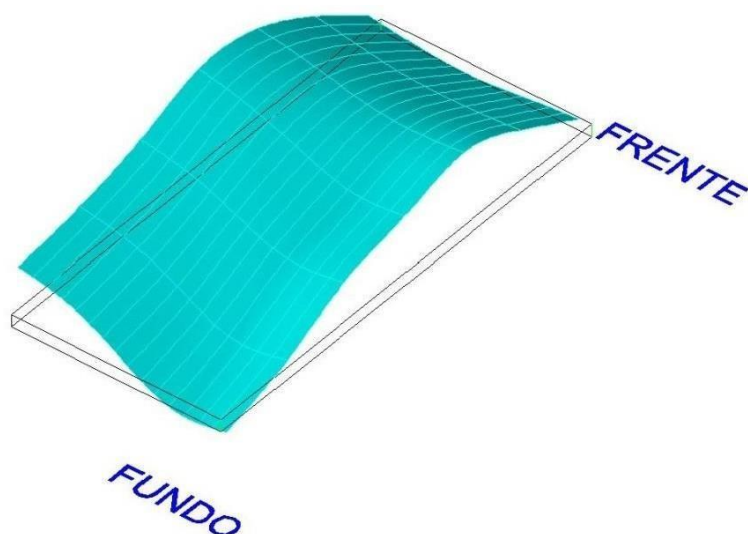


Figura 59 – Primeiro modo de vibração de laje maciça 1 – 0kN

Os valores obtidos no StarModal (frequência e amortecimento) foram comparados com os obtidos por decaimento. Intervalos que fornecessem dados discrepantes em relação ao esperado eram excluídos (caso fornecessem amortecimentos negativos ou frequências que visualmente não existiam, por exemplo). Cada modo obtido gerava coordenadas, que eram representadas por amplitude e fase. Com esses valores, plotou-se o gráfico de cada modo (EWINS, 1894).

As Tabelas de 16 à 22 mostram os parâmetros modais obtidos para as lajes maciças em seus diversos estágios de fissuração, atentando que o valor do amortecimento modal já está aqui expresso em percentagem.

LAJE MACIÇA 1 - Resultados obtidos do Star Modal - 0 kN(Laje sã)			
Modo 1			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	16.9882	0.0769	0.45
Modo 2			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	22.9993	0.4234	1.84

Tabela 16 – Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 1 – 0kN (laje sã)



LAJE MACIÇA 1 - Resultados obtidos do star modal - 16 kN			
Modo 1			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	11.9162	0.0054	0.05
Modo 2			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	23.0461	0.5218	2.26
Modo 3			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	35.4043	0.9913	2.80

Tabela 17 – Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 1 – 16kN

LAJE MACIÇA 1 - Resultados obtidos do star modal - 22 kN			
Modo 1			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	10.8323	0.2155	1.99
Modo 2			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	15.1695	0.5308	3.50
Modo 3			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	22.7780	0.4784	2.10

Tabela 18 - Resultados obtidos do star modal para a laje maciça 1- 22 kN

LAJE MACIÇA 2 - Resultados obtidos do Star Modal - 0 kN (Laje sã)											
Modo 1											
Modo 2											
<table> <tr> <th>Mode</th><th>Frequency (Hz)</th><th>Damping (Hz)</th><th>Damping (%)</th></tr> <tr> <td>1</td><td>32.9578</td><td>1.4620</td><td>4.43</td></tr> </table>				Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)	1	32.9578	1.4620	4.43
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)								
1	32.9578	1.4620	4.43								

Tabela 19 – Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 0kN (laje sã)

LAJE MACIÇA 2 - Resultados obtidos do Star Modal - 8 kN											
Modo 1											
Modo 2											
Modo 3											
<table> <tr> <th>Mode</th><th>Frequency (Hz)</th><th>Damping (Hz)</th><th>Damping (%)</th></tr> <tr> <td>1</td><td>42.2852</td><td>1.0859</td><td>2.57</td></tr> </table>				Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)	1	42.2852	1.0859	2.57
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)								
1	42.2852	1.0859	2.57								

Tabela 20 - Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 8kN

LAJE MACIÇA 2 - Resultados obtidos do Star Modal - 16 kN			
Modo 1			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	11.6571	0.2345	2.01
Modo 2			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	31.1856	0.6834	2.19
Modo 3			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	38.6781	1.4364	3.71

Tabela 21 - Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 16kN

LAJE MACIÇA 2 -Resultados obtidos do star modal - 22 kN			
Modo 1			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	8.9096	0.0622	0.70
Modo 2			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	32.6982	0.7220	2.21
Modo 3			
Mode	Frequency (Hz)	Damping (Hz)	Damping (%)
1	38.2794	1.2563	3.28

Tabela 22- Resultados obtidos do StarModal para a laje maciça 2 – 22kN

Diante dos resultados, o processamento no StarModal ratifica e valida os resultados obtidos pelo método do decaimento. Encontraram-se valores muito próximos dos parâmetros modais pelos dois métodos e o StarModal acrescentou resultados que só puderam ser obtidos com o auxílio do mesmo. As Figuras 46 a 49 mostram a variação do amortecimento e frequência à medida que as lajes maciça 1 e 2 foram sendo submetidas aos estágios de carga.

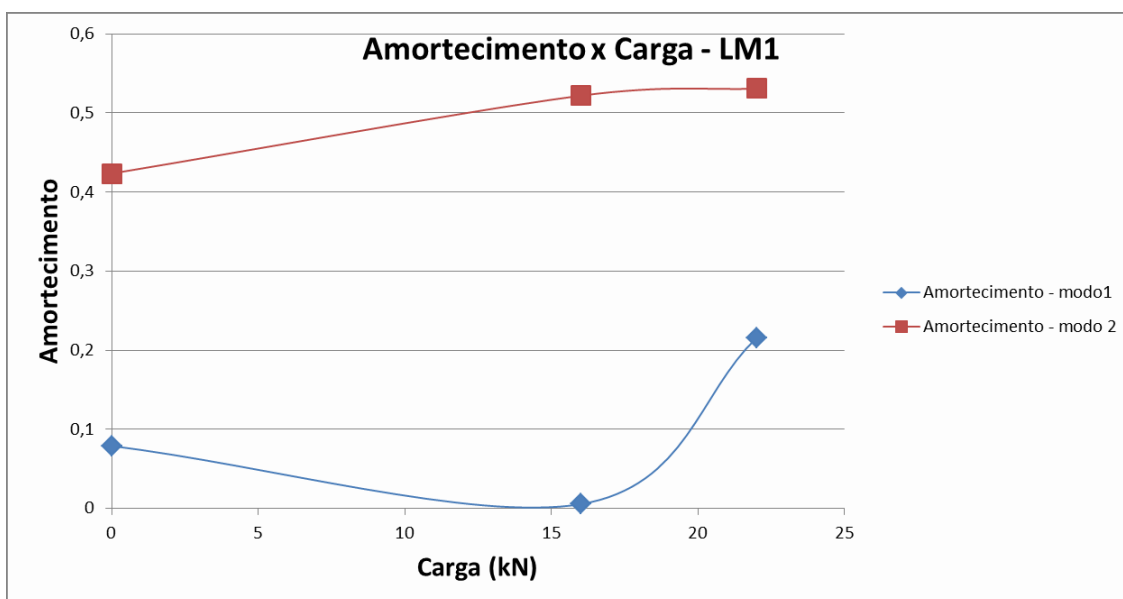


Figura 60 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga.

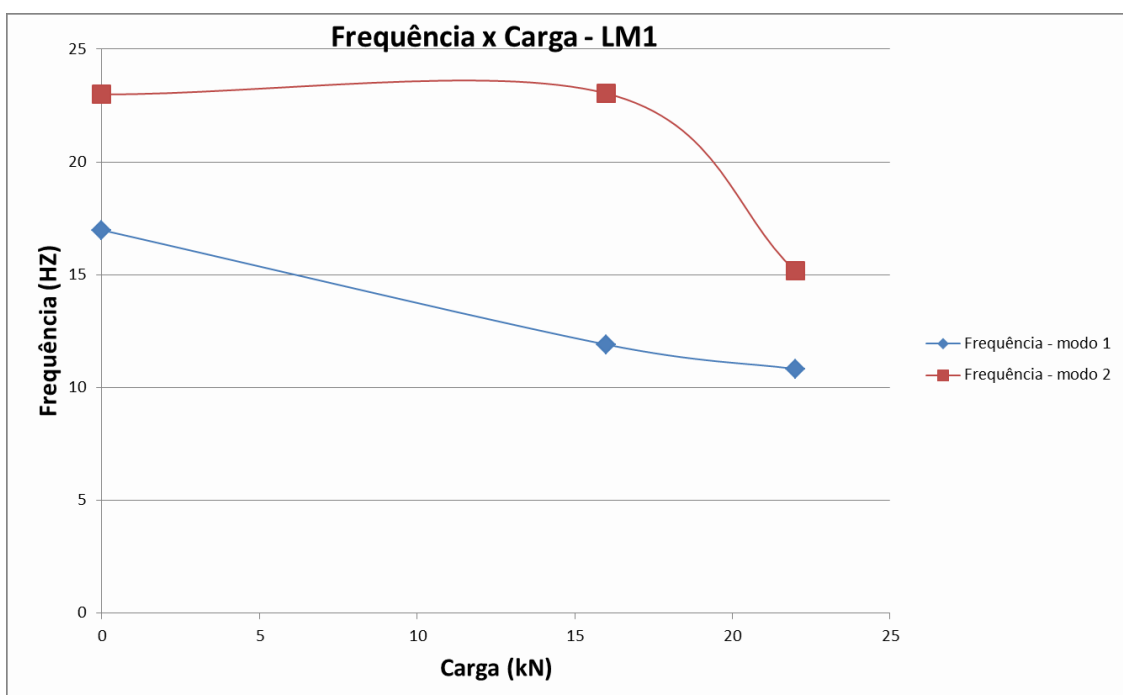


Figura 61 - Variação da frequência obtida pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 1 em cada estágio de carga.

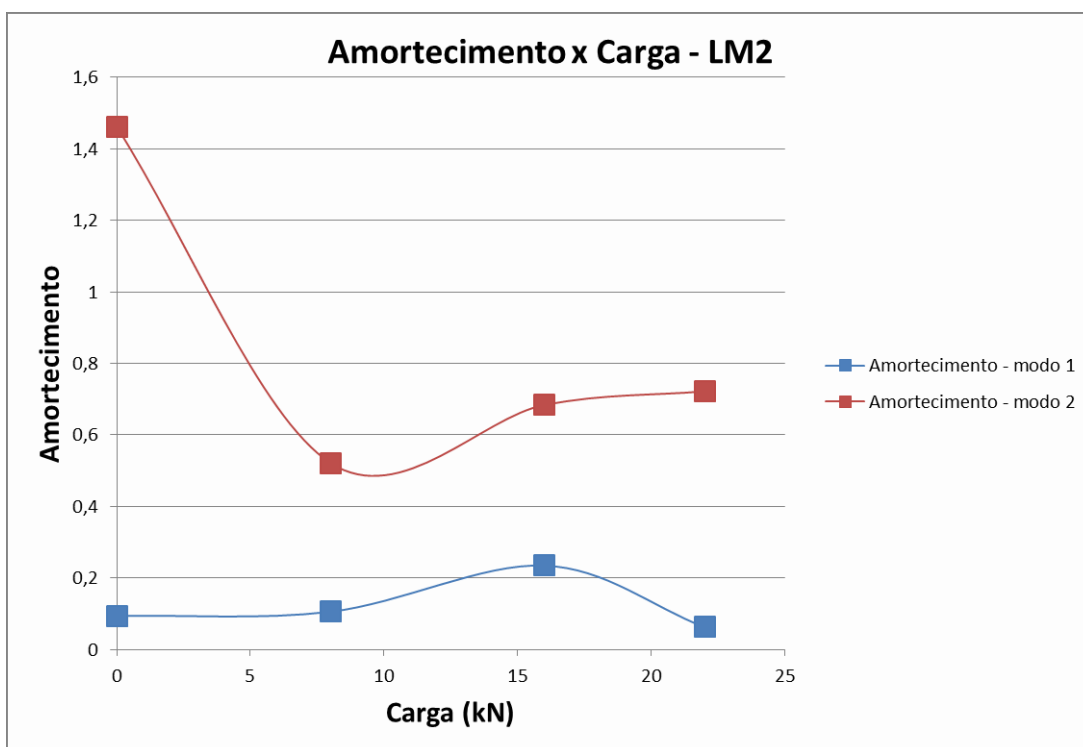


Figura 62 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 2 em cada estágio de carga.

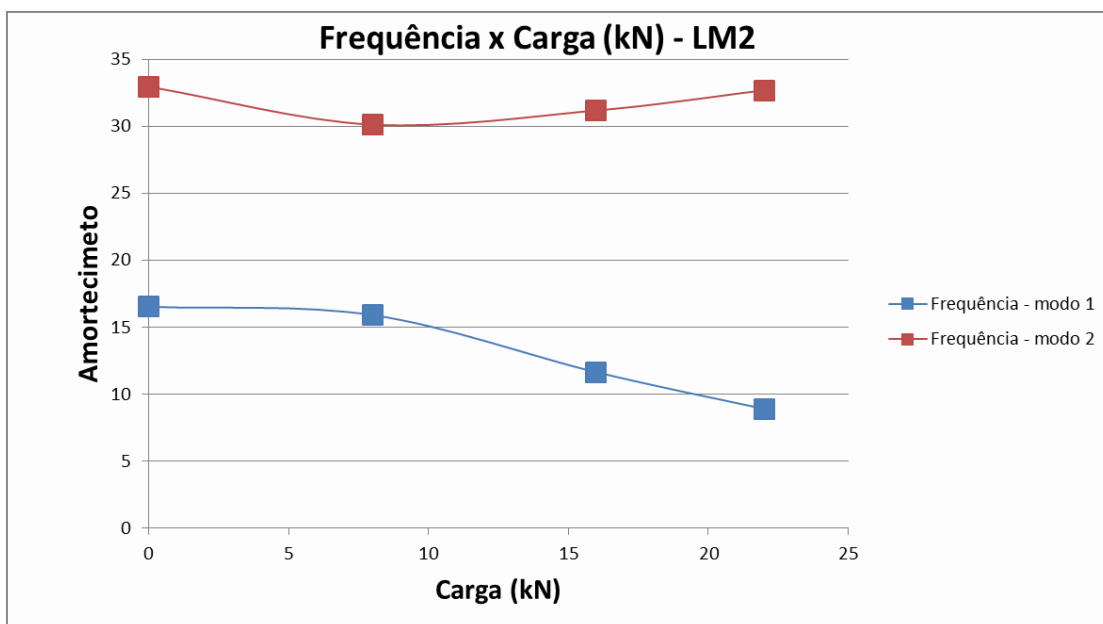


Figura 63 - Variação da frequência obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje maciça 2 em cada estágio de carga.

#### 434. Aplicação do MAC para verificação dos modos das lajes maciças

Foi utilizada a metodologia de cálculo do índice MAC descrita no subitem 2.1.3.2 para comparação entre as matrizes vetoriais dos modos de vibração das lajes maciças. O MAC foi aplicado entre os modos dos diferentes carregamentos da mesma

laje e entre os modos dos mesmos carregamentos para as duas lajes maciças. As Tabelas 23, 24 e 25 mostram os resultados.

<b><i>MODO 1 - LM 1</i></b>			
	0kN	16kN	22kN
0kN	-	0,91	0,93
16kN	0,91	-	0,97
22kN	0,93	0,97	-

Tabela 23 – MAC entre os carregamentos para LM1 em seu primeiro modo de vibração.

<b><i>MODO 1 - LM 2</i></b>				
	0kN	8kN	16kN	22kN
0kN	-	0,98	0,92	0,71
8kN	0,98	-	0,92	0,72
16kN	0,92	0,92	-	0,69
22kN	0,71	0,72	0,69	-

Tabela 24 – MAC entre os carregamentos para a LM2 em seu primeiro modo de vibração.

<b><i>MODO 1</i></b>			
LM1/LM2	0kN	16kN	22kN
0kN	<b>0,91</b>	-	-
16kN	-	<b>0,92</b>	-
22kN	-	-	<b>0,69</b>

Tabela 25 – MAC entre as Lajes para seu primeiro modo em cada carregamento.

Pastor et al. (2012) afirmaram que valores maiores do que 0,90 indicam correspondência consistente enquanto que os valores pequenos indicam semelhança pobre entre os dois modos de vibração. Nos resultados, percebe-se que para a laje maciça 1 todos os seus MAC's estão acima de 0,90 quando comparados entre seus carregamentos, já para laje maciça 2 apenas a comparação após o estágio de 22kN o MAC foi um pouco inferior, talvez devido a efeitos não lineares decorrentes do nível de fissuração.

Na aplicação do MAC para comparação entre os modos de vibração da LM1 com a LM2, os resultados se mostraram bastantes consistentes nos estágio de 8kN e 16kN e razoavelmente consistentes para os modos 22kN.

Em geral a aplicação do MAC mostrou que os modos de vibração são proporcionais, o que era um resultado esperado, haja vista que se trata de lajes feitas para serem réplicas uma da outra.

#### 435. Aplicação de índice de detecção de dano

Como foi citado no referencial teórico, Kim et al. (2005), utilizaram um índice de avaliação de danos em pontes que foram submetidas a abalos sísmicos, para verificar o estado estrutural das mesmas, propondo a Tabela 1 apresentada na seção 2.2 deste trabalho.

Baseado no índice de Kim et al. (2005), foi feita uma análise do estado das lajes e aplicado o índice para verificação de seu estado de dano estrutural, obtendo-se as Tabelas 23 e 24.

ÍNDICE DE DANO - LAJE MACIÇA 1 - MODO 1			
Carga Aplicada (KN)	Frequência Natural (HZ)	Cálculo do índice DI	
0	16,99	-	-
16	11,92	0,508	DANO NÃO PODE SER REPARADO
22	10,83	0,594	DANO NÃO PODE SER REPARADO

Tabela 26 – Aplicação do índice de detecção de dano para a laje maciça 1

ÍNDICE DE DANO - LAJE MACIÇA 2 - MODO 1			
Carga Aplicada (KN)	Frequência Natural (HZ)	Cálculo do índice DI	
0	16,54	-	-
8	15,92	0,074	DANO QUE PODE SER REPARADO
16	11,66	0,503	DANO NÃO PODE SER REPARADO
22	8,91	0,710	DANO NÃO PODE SER REPARADO

Tabela 27 – Aplicação do índice de detecção de dano para a laje maciça 2

Verificou-se que para ambas as lajes as cargas de 16kN e 22kN geraram danos que não podem ser reparados, segundo a classificação de Kim et al.(2005). Notando que

para a carga de 22kN a laje maciça 2 apresentou um índice muito próximo ao índice de colapso, segundo a classificação de Stone et al. (1993). A laje maciça 2, também teve o estágio de carga de 8kN, e seu índice mostrou que esta carga induziu um dano que pode ser reparado.

Ao compararmos os resultados do índice proposto, que utiliza parâmetros modais para identificação do estado de dano da estrutura, com os testes estáticos das deflexões obtidas em cada estágio de aplicação de carga, observamos que ambos apresentam resultados similares para avaliação estrutural das lajes.

O índice de Kim et al. (2005) mostra que a carga de 8kN aplica um dano que pode ser reparado, enquanto os testes estáticos mostram que apenas com aplicação do ciclo de carga inicial (8kN), a estrutura ainda trabalha em regime linear, visto que a curva de deflexão não muda bruscamente de inclinação quando comparado aos outros estágios de aplicação de carga, ou seja, os resultados estáticos estão em consonância com os dinâmicos.

Ainda nos testes estáticos, observou-se que a curvatura do gráfico das deflexões muda de inclinação para os estágios de 16kN e 22kN, o que é um indício de que a estrutura sofre variações de rigidez mais expressivas, o que dificulta consideravelmente sua possibilidade de ser reparada, fato este também evidenciado pelos parâmetros modais utilizados pelo índice de Kim et al.(2005).

As Figuras 50, 51 e 52, mostram as fissuras da laje maciça 2 para os estágios de 8kN, 16kN e 22kN, que evidenciam ainda mais seu estágio de dano e a eficiência do índice proposto por Kim et al. (2005). A fissura marcada em preto surgiu após a aplicação da carga de 8kN, as marcadas em vermelho surgiram após a aplicação da carga de 16kN, e as marcadas em verde surgiram após a aplicação da carga de 22kN.





Figura 64 – Fissuras (em preto) surgidas após a aplicação da carga de 8KN. Foto da laje vista de baixo.



Figura 65 - Fissuras (em vermelho) surgidas após a aplicação da carga de 16KN. Foto da laje vista de baixo.



Figura 66 - Fissuras (em verde) surgidas após a aplicação da carga de 22KN. Foto da laje vista de baixo.

#### **4.3.6. Frequência x Número de ciclos do sinal filtrado**

Outra análise feita foi a dos gráficos que relacionavam as frequências e o número de ciclos ao longo do sinal do decaimento. Não foi encontrado nenhum trabalho que utilizasse essa mesma abordagem como indicativo de danos em estruturas por testes modais, porém devido a sua coerência com os resultados dos testes estáticos e com o índice de dano proposto por Kim et al. (2005), considera-se que há indícios suficientes de que esta abordagem pode ser eficiente.

Ao longo do processamento do sinal filtrado para obtenção dos parâmetros modais por decaimento, foram elaborados gráficos que relacionaram o número de ciclos do sinal filtrado, com sua frequência correspondente, como mostra os gráficos correspondentes as Figuras 53 e 54 para as lajes maciças 1 e 2.

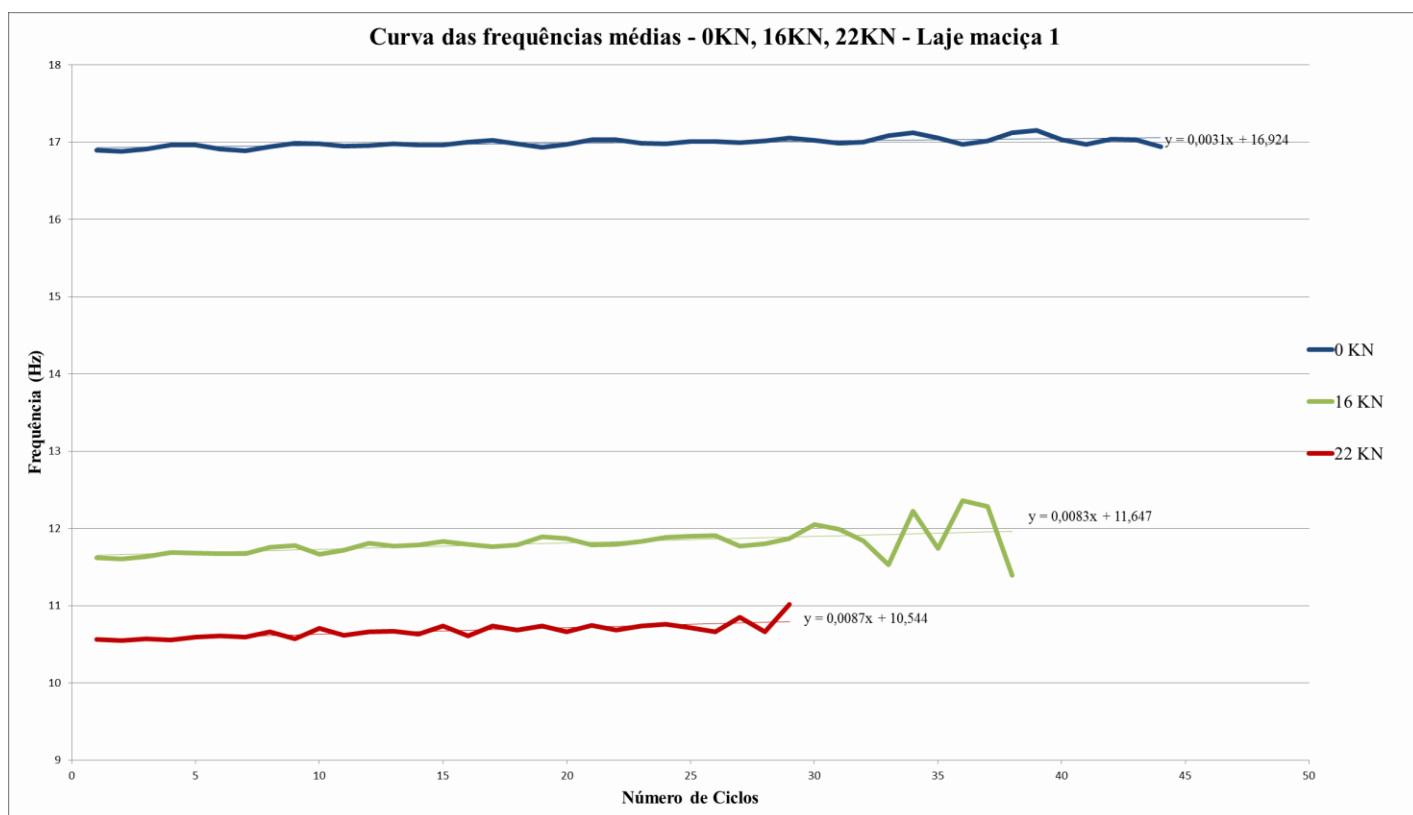


Figura 67 – Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 1

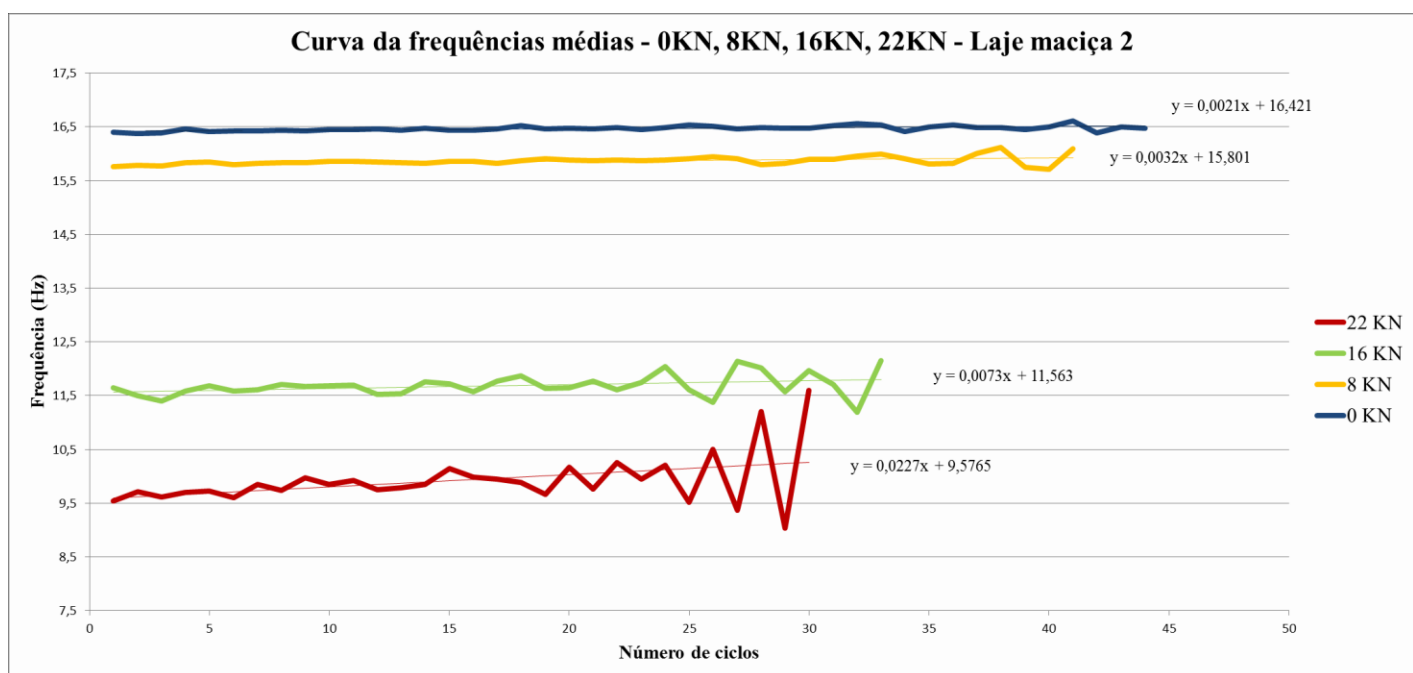


Figura 68 - Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 2

Diante dos gráficos, observa-se que os coeficientes angulares das curvas lineares de tendência crescem a medida que a laje se encontra mais danificada. Com a laje sã, a média das frequências ao longo do sinal do decaimento não cresce tanto quanto com a

laje danificada. O mesmo processamento feito com marteladas de mais intensidade evidencia melhor o ocorrido, como mostra as Figuras 55 e 56.

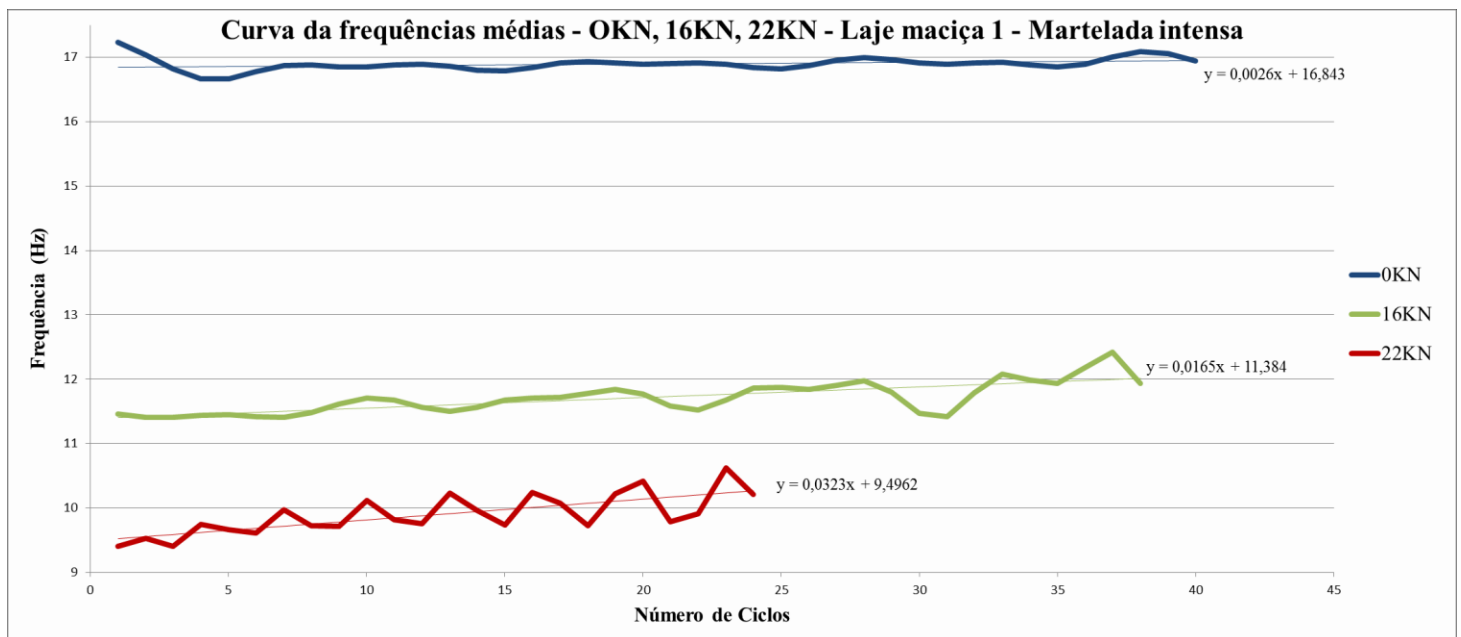


Figura 69 – Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 1 (martelada intensa)

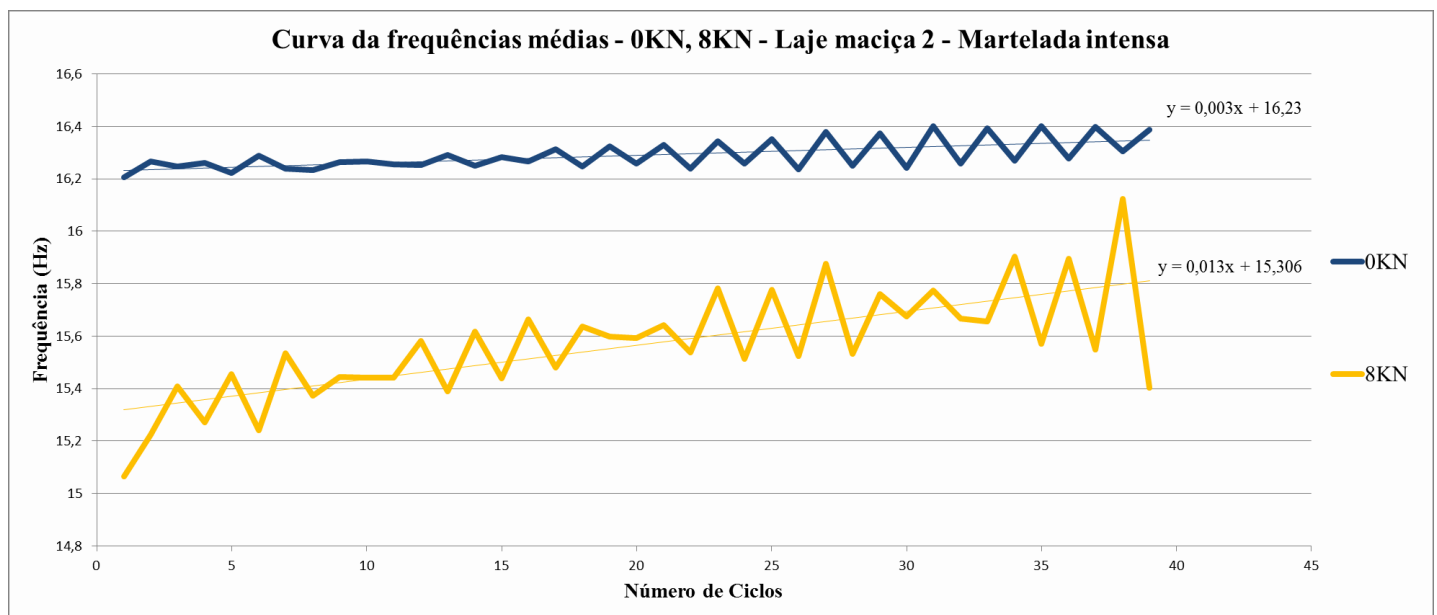


Figura 70 - Gráfico da Frequência x Número de ciclos ao longo do sinal filtrado para a laje maciça 2 (martelada intensa)

Nos gráficos elaborados a partir do sinal das marteladas mais intensas observou-se o aumento mais acentuado do coeficiente angular, o que pode significar uma maior sensibilidade desse tipo de análise para marteladas mais fortes. Para a Laje maciça 2, só se conseguiu processar o sinal da martelada intensa para os dois primeiros ciclos de

carga, pois os ciclos de 16kN e 22kN apresentaram modos de vibração muito próximos que não puderam ser processados pelo métodos do decaimento.

A fim de se comparar os resultados do índice de Kim et al. (2005) com os coeficientes angulares encontrados nos gráficos das curvas das frequências ao longo do decaimento foi elaborado o gráfico da Figura 57.

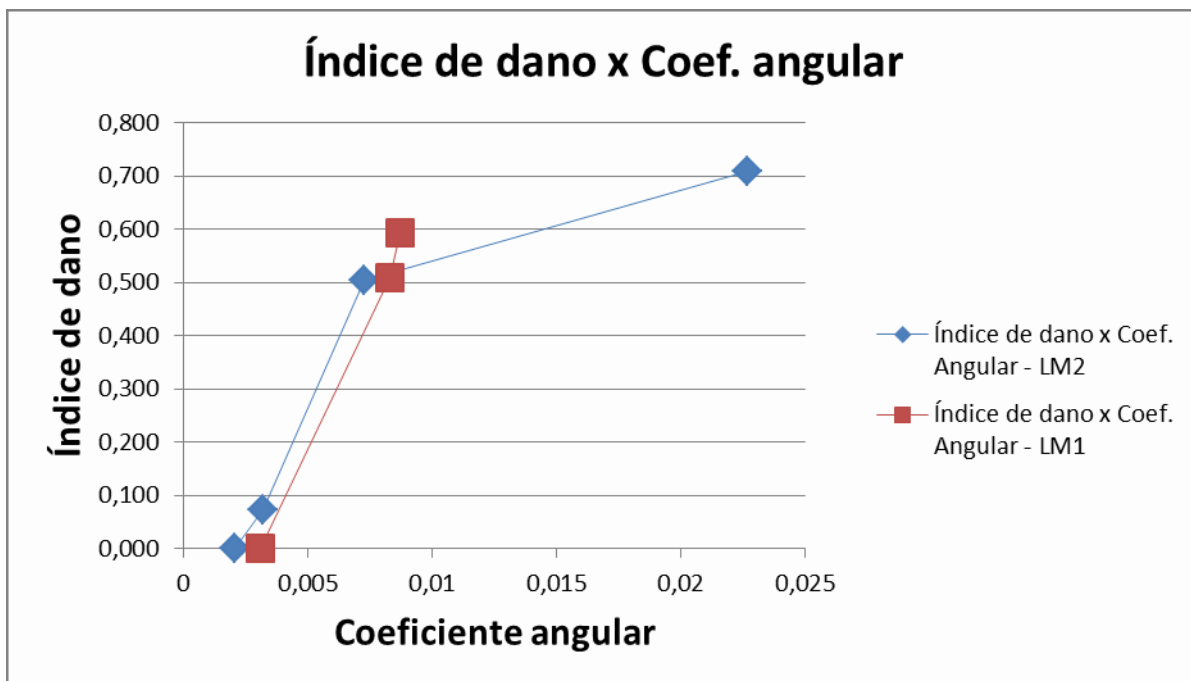


Figura 71 – Gráfico do índice de Kim et al. (2005) x Coeficientes angulares obtidos através das curvas de frequência ao longo do decaimento.

Percebe-se que tanto o índice de dano quanto o coeficiente angular aumentam, porém as curvas da laje maciça 1 e da laje maciça 2 apresentaram comportamentos diferentes.

#### 4.3.7. Tempo de trânsito

Outra medida feita foi a do tempo de trânsito, que visava obter o intervalo de tempo entre a excitação da estrutura e o tempo que a onda gerada pelo impacto levava para percorrer a laje até a posição onde se encontrava o acelerômetro. Excitação e acelerômetro estavam em extremidades opostas longitudinalmente distante 1,75m um do outro. O tempo de trânsito foi medido tanto por cima como por baixo da laje. Apenas na laje 2 é que tais medidas foram efetuadas. Os valores estão mostrados nas Tabelas 25 à 30.

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRAO
m33a12	1	0,0010747	0,00103456	0,000200609
m33a12	2	0,0006837		
m33a12	3	0,0009767		
m33a12	4	0,0011677		
m33a12	5	0,00127		

Tabela 28 - Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 0 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRAO
m33a12	1	0,0015577	0,00136588	0,000184409
m33a12	2	0,001564		
m33a12	3	0,00127		
m33a12	4	0,0010747		
m33a12	5	0,001363		

Tabela 29 – Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 8 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRAO
m33a12	1	0,0014677	0,00124445	0,000145848
m33a12	2	0,0012677		
m33a12	3	0,0011677s		
m33a12	4	0,0010747		
m33a12	5	0,0011677		

Tabela 30 – Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 16 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRAO
m33a12	1	0,0011677	0,00123042	0,000133764
m33a12	2	0,0014677		
m33a12	3	0,001172		
m33a12	4	0,0010747		
m33a12	5	0,00127		

Tabela 31 – Tempo de trânsito medido por baixo na laje 2 com 16KN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRAO
m33a12	1	0,0016577	0,00152116	0,000170034
m33a12	2	0,0016577		
m33a12	3	0,001365		
m33a12	4	0,0012677		
m33a12	5	0,0016577		

Tabela 32 - Tempo de trânsito medido por cima na laje 2 com 22 kN



NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRAO
m33a12	1	0,0010747	0,0010727	8,54237E-05
m33a12	2	0,0011677		
m33a12	3	0,0009767		
m33a12	4	0,0011677		
m33a12	5	0,0009767		

Tabela 33 - Tempo de trânsito medido por baixo na laje 2 com 22 kN

Ao compararmos os tempos de trânsito medidos por cima da laje, notou-se que, com exceção do tempo medido após a aplicação carga de 16kN, o tempo mantém uma tendência de alta a medida que foi aumentado o estágio de fissuração. Já a medição do tempo de trânsito por baixo da laje foi feita apenas após a aplicação das cargas de 16kN e 22kN e teve seu tempo diminuído com o aumento da carga aplicada. Diante dos resultados não se pode afirmar que o tempo de transito pode ser indicador de estágio de fissuração, neste trabalho este parâmetro foi utilizado apenas como teste complementar. A Figura 58 ilustra o ocorrido.

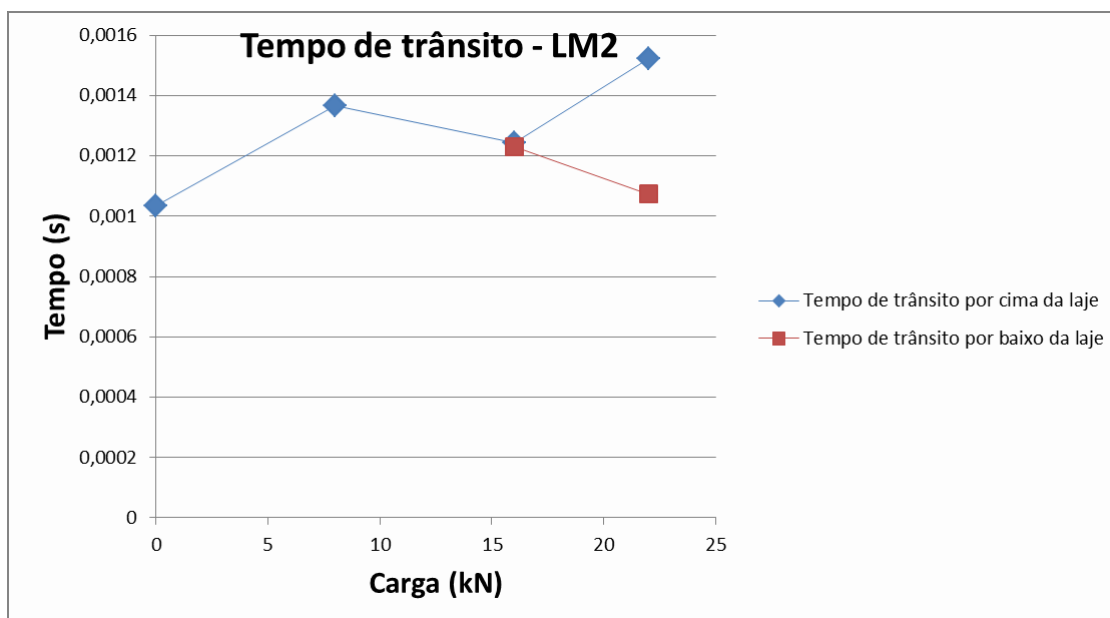


Figura 72 – Variação do tempo de trânsito com a carga aplicada na laje maciça 2.

#### 4.4. Testes dinâmicos nas lajes Nervuradas

##### 4.4.1. Testes de Linearidade e Reciprocidade

No que diz respeito ao processamento dos testes modais, foram feitas as análises dos testes de linearidade e reciprocidade das lajes nervuradas. Como já citado no item 3.2.1.2. e mostrado no item 4.3.1 para as lajes maciças, os teste de linearidade consiste na aplicação de cargas de impacto com diferentes intensidades no mesmo nó e no de

reciprocidade avaliam-se as FRF's obtidas em pontos distintos, pela inversão da posição entre ponto de excitação e ponto de resposta. Os resultados dos testes de reciprocidade estão nas Figuras 87 a 93. Já os de linearidade nas Figuras 94 a 100.

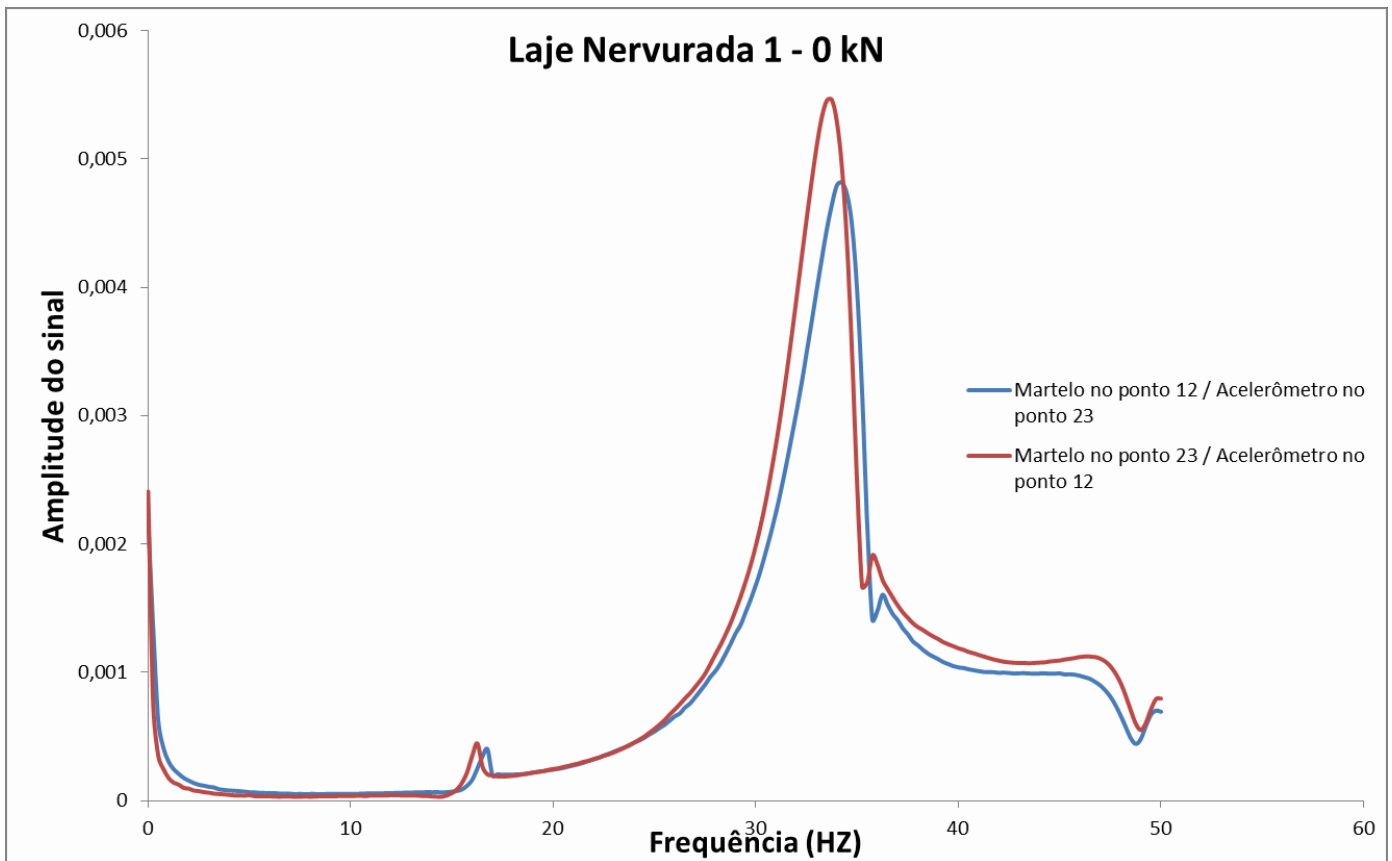


Figura 73 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje nervurada 1 – 0kN.



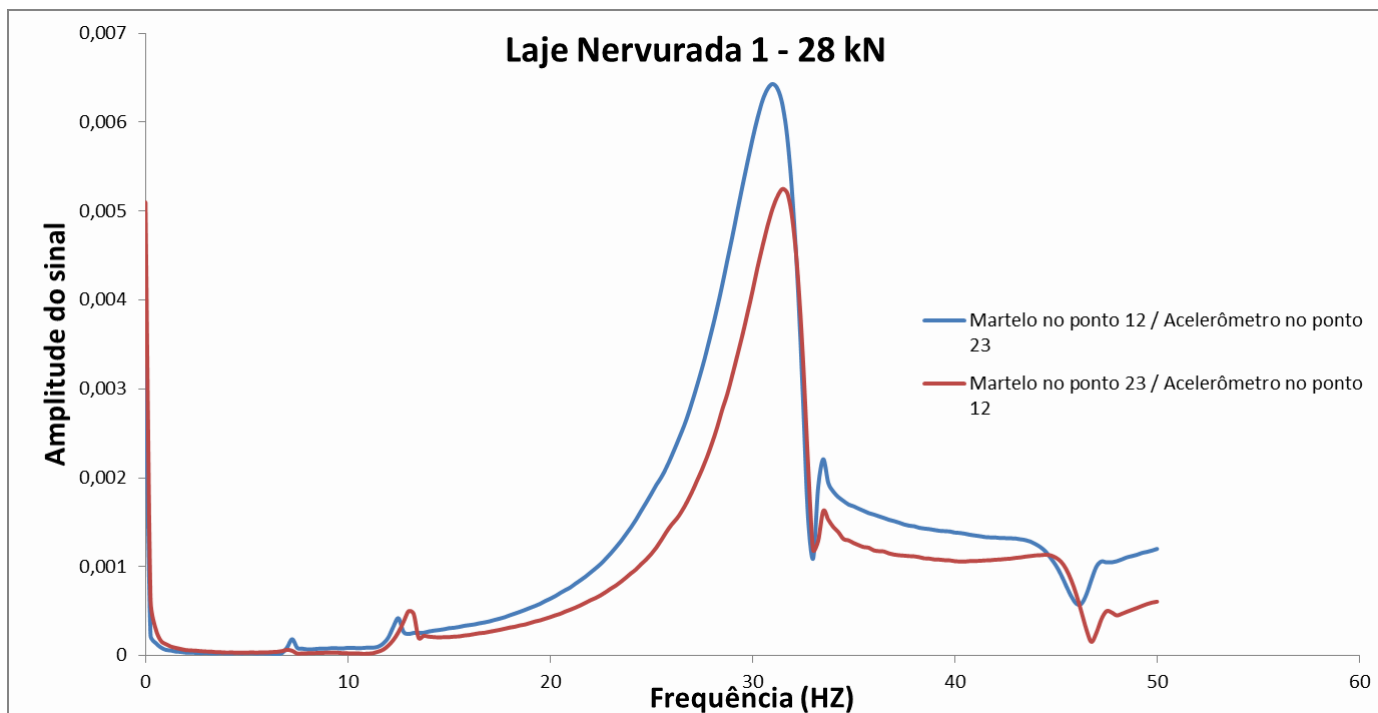


Figura 74 - Reciprocidade entre excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12 e excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23, para laje nervurada 1 – 28kN.

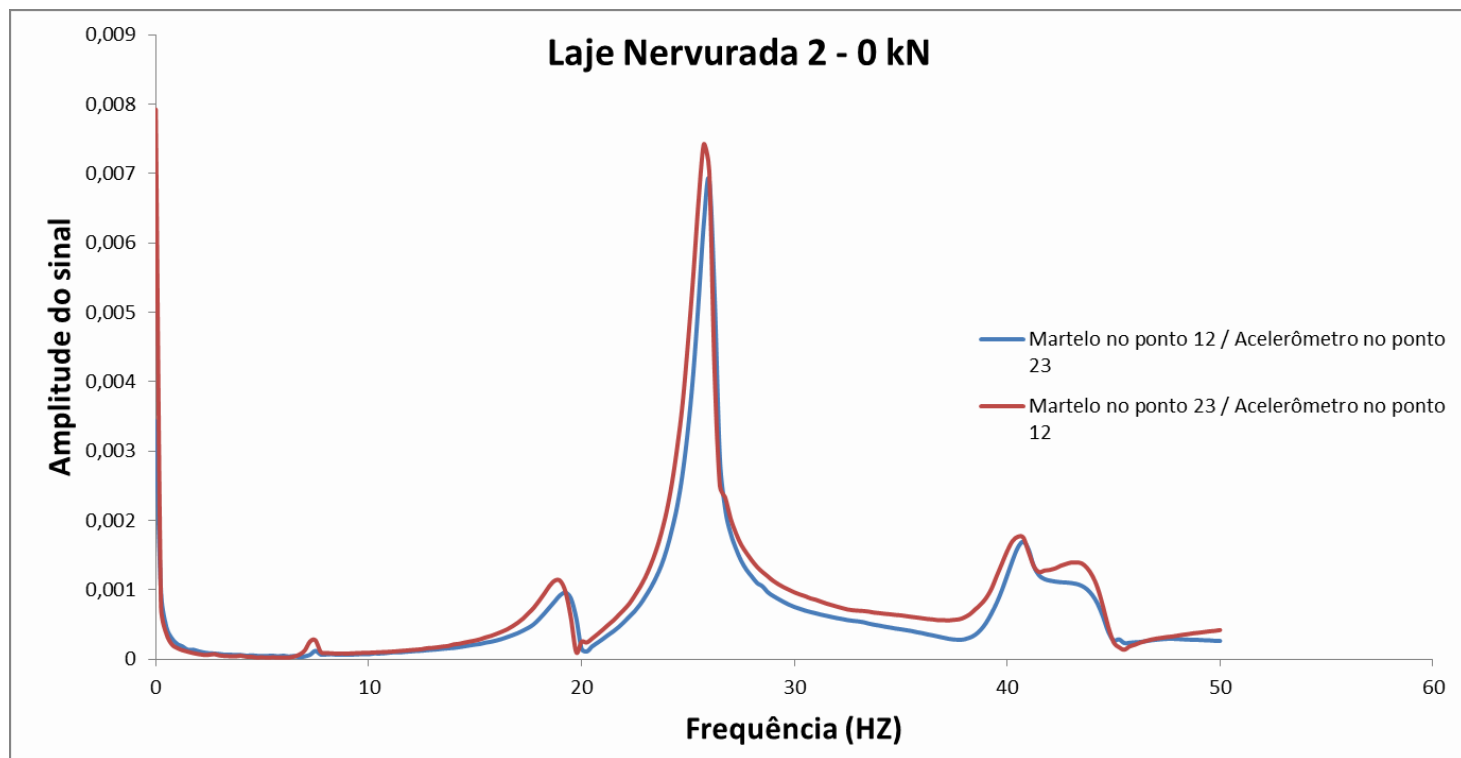


Figura 75 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23 e excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 0kN.

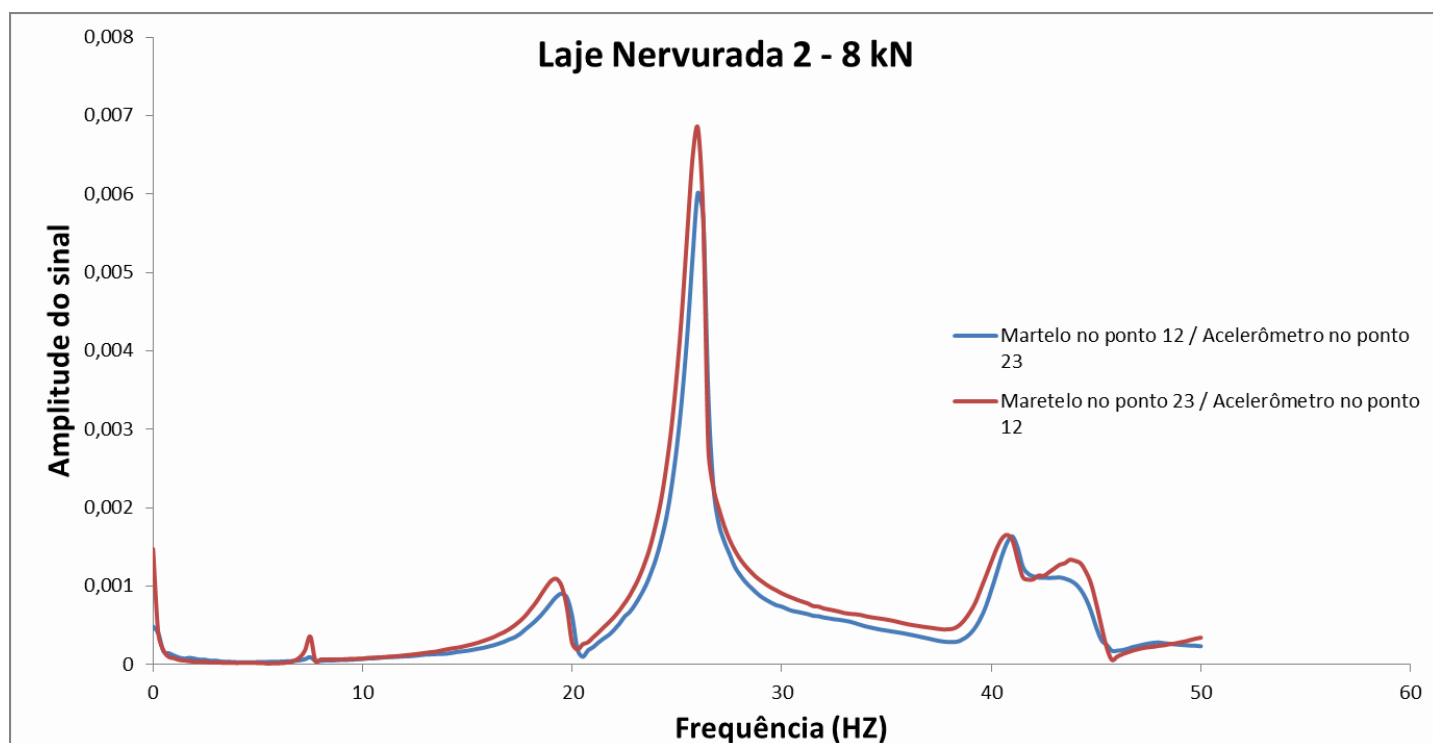


Figura 76 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23 e excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 8kN.

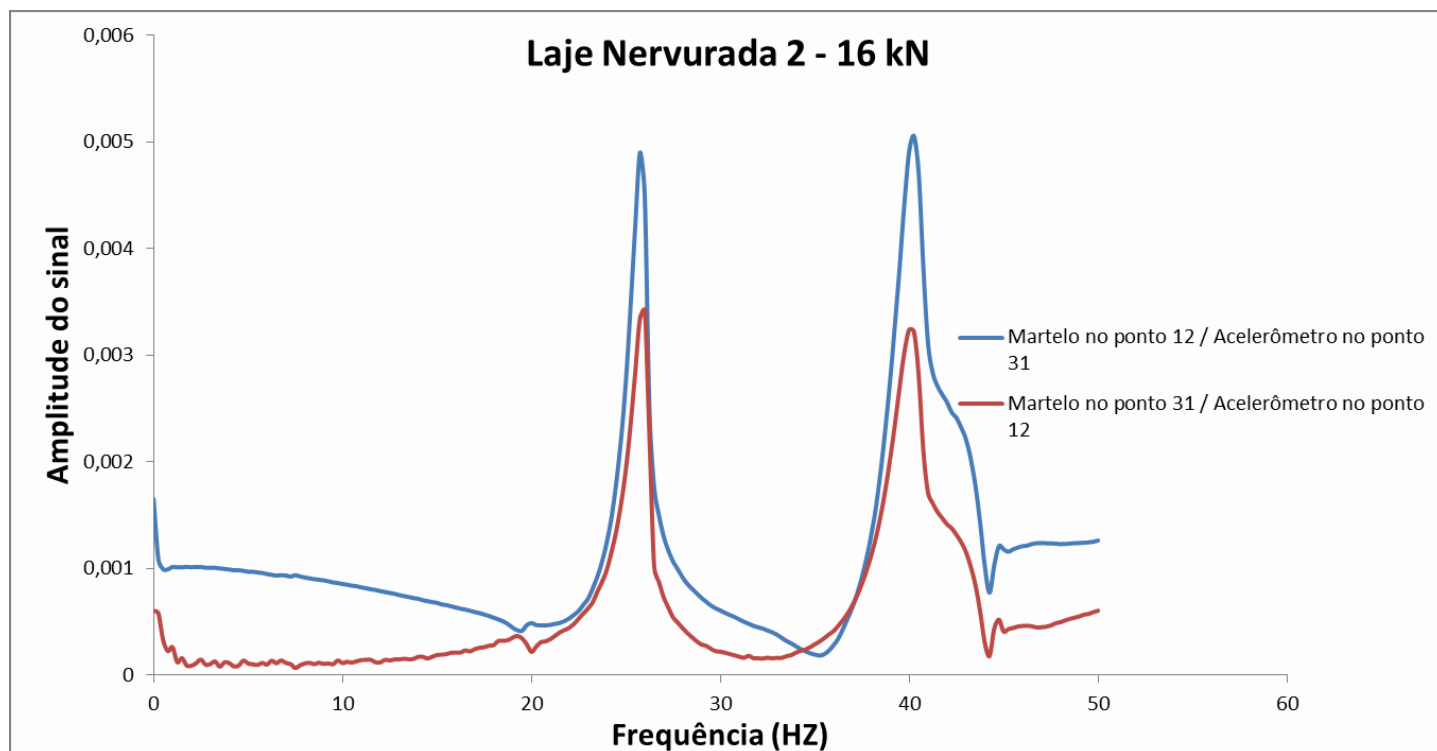


Figura 77 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 31 e excitação no ponto 31 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 16kN.

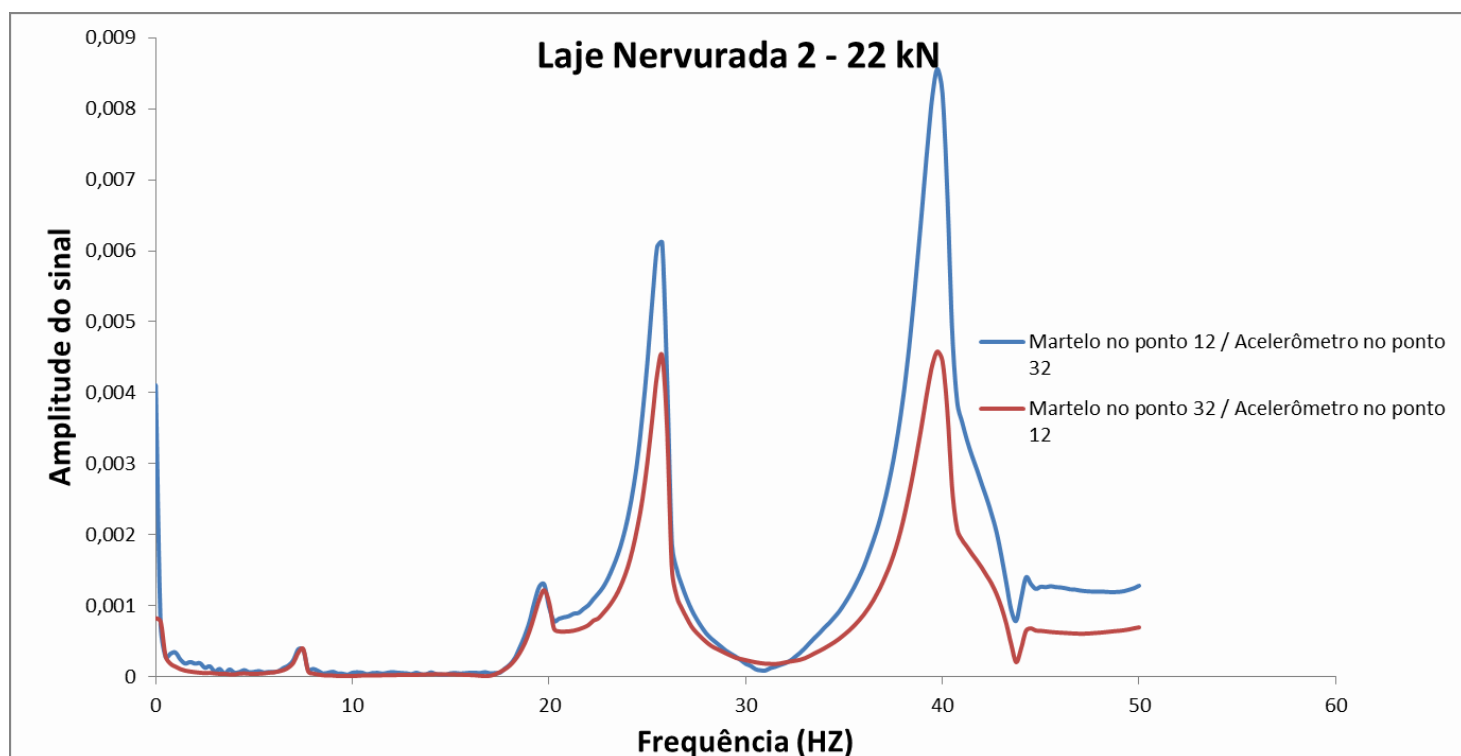


Figura 78 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 32 e excitação no ponto 32 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 22kN.

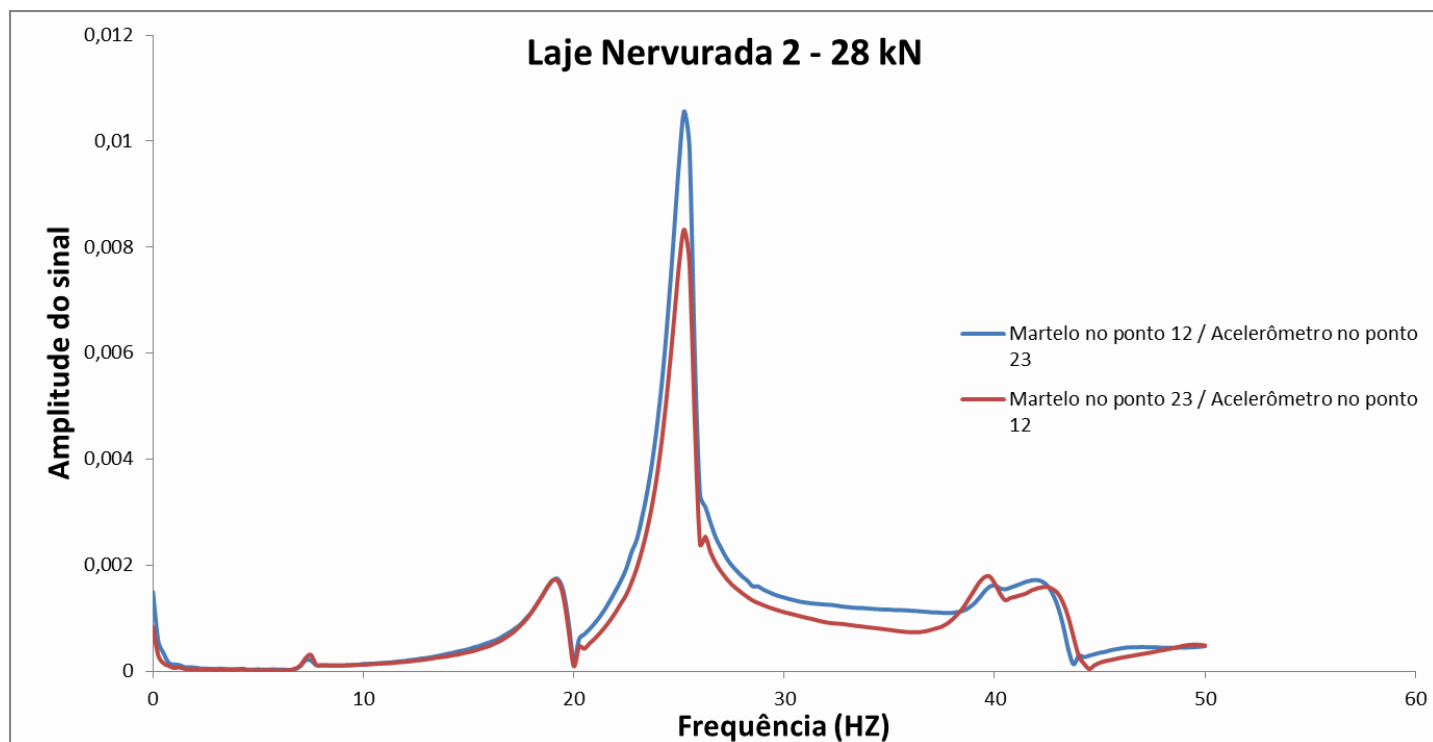


Figura 79 - Reciprocidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 23 e excitação no ponto 23 e resposta no ponto 12, para laje nervurada 2 – 28kN.

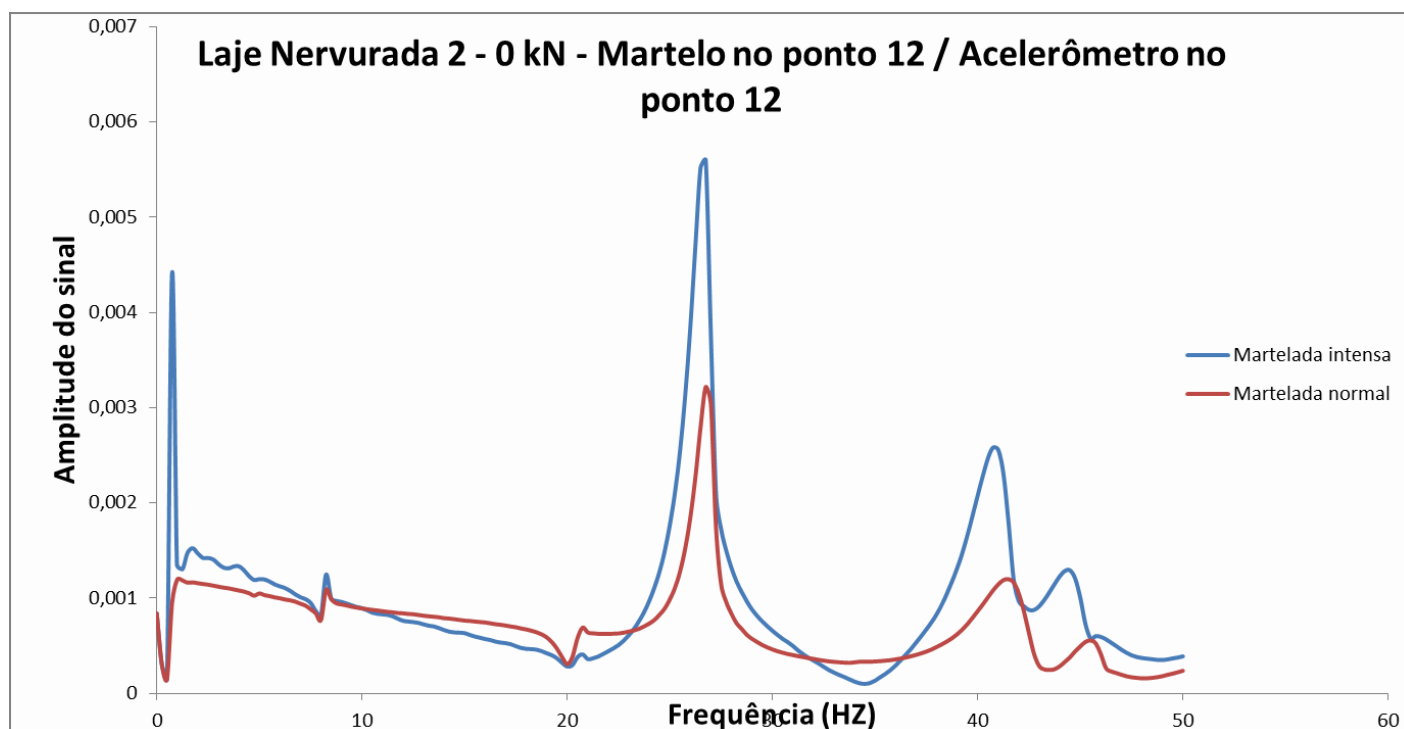


Figura 80 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 1 – 0kN.

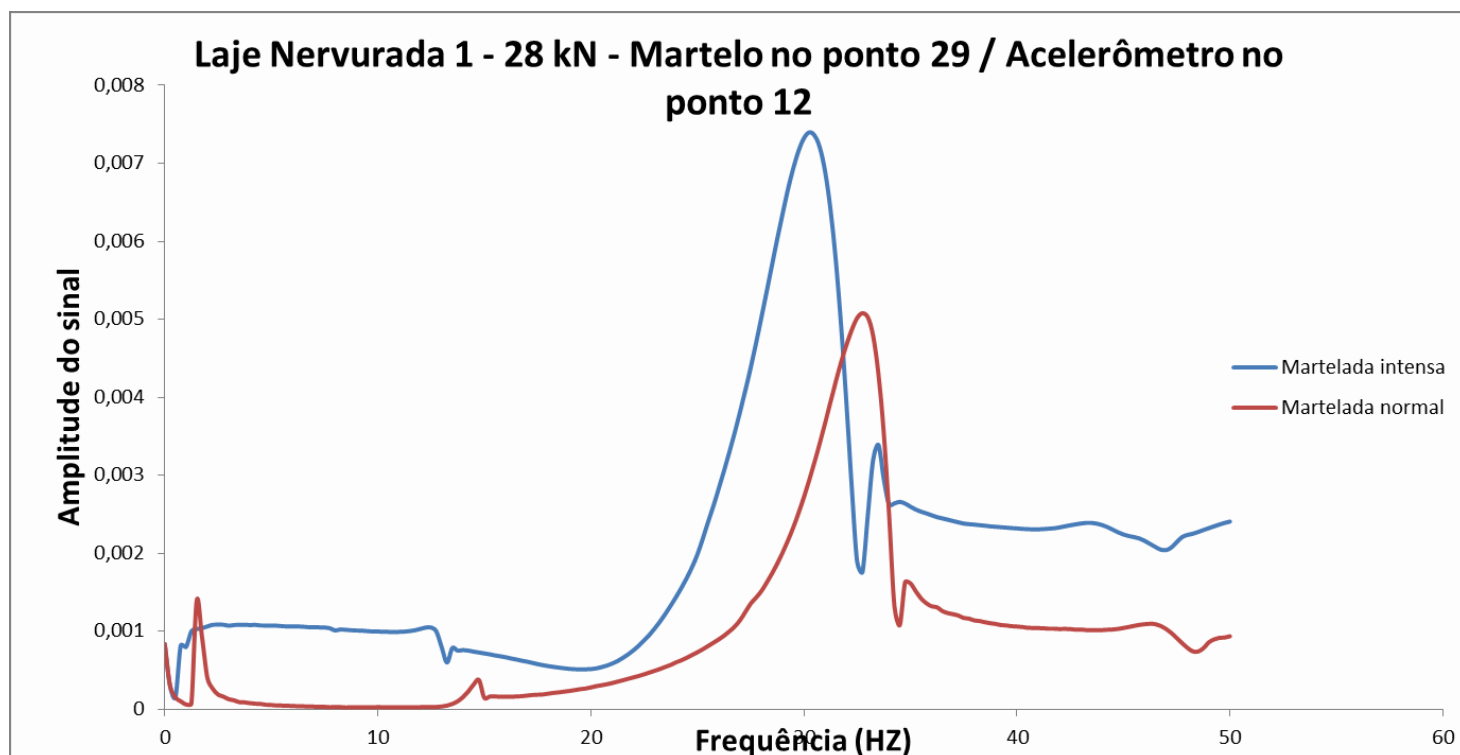


Figura 81 - Linearidade entre excitação no ponto 29 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 1 – 28kN.

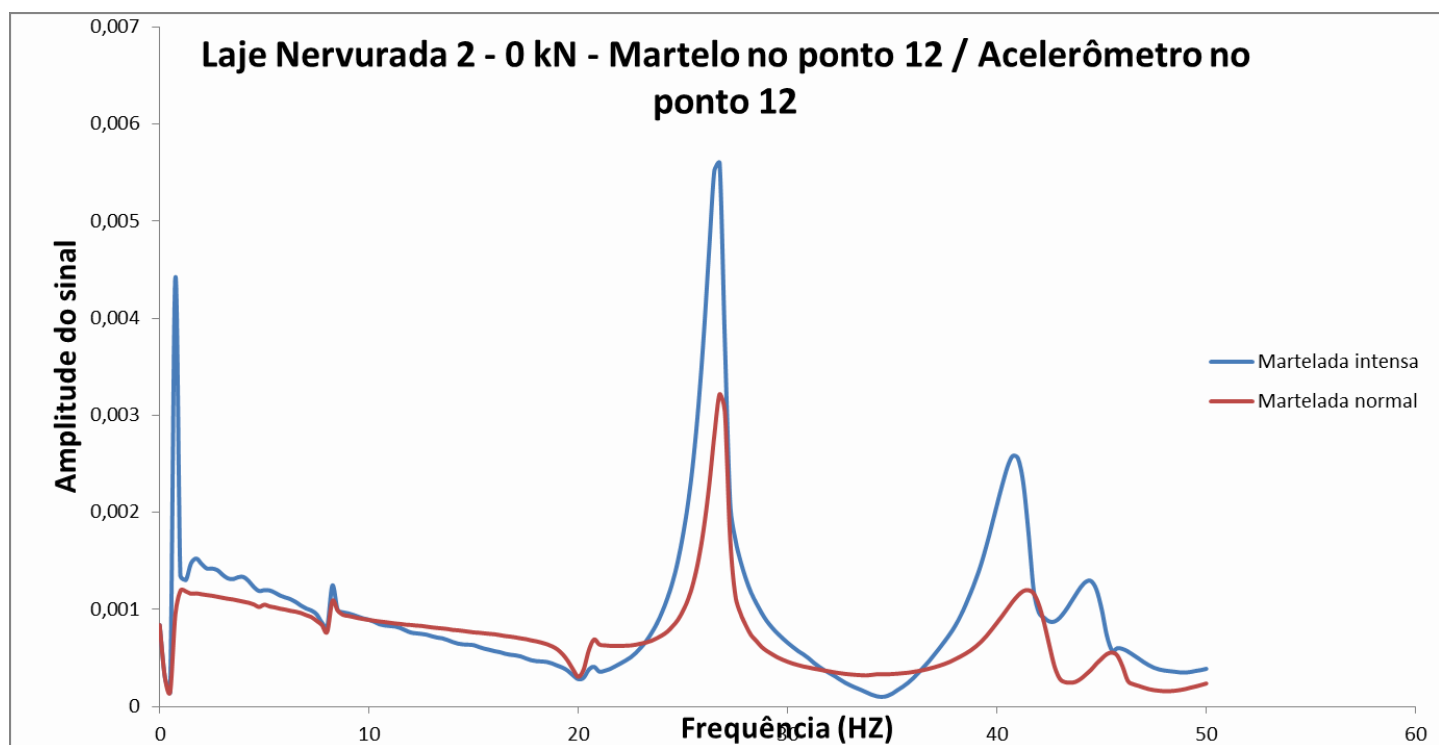


Figura 82 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 0kN.

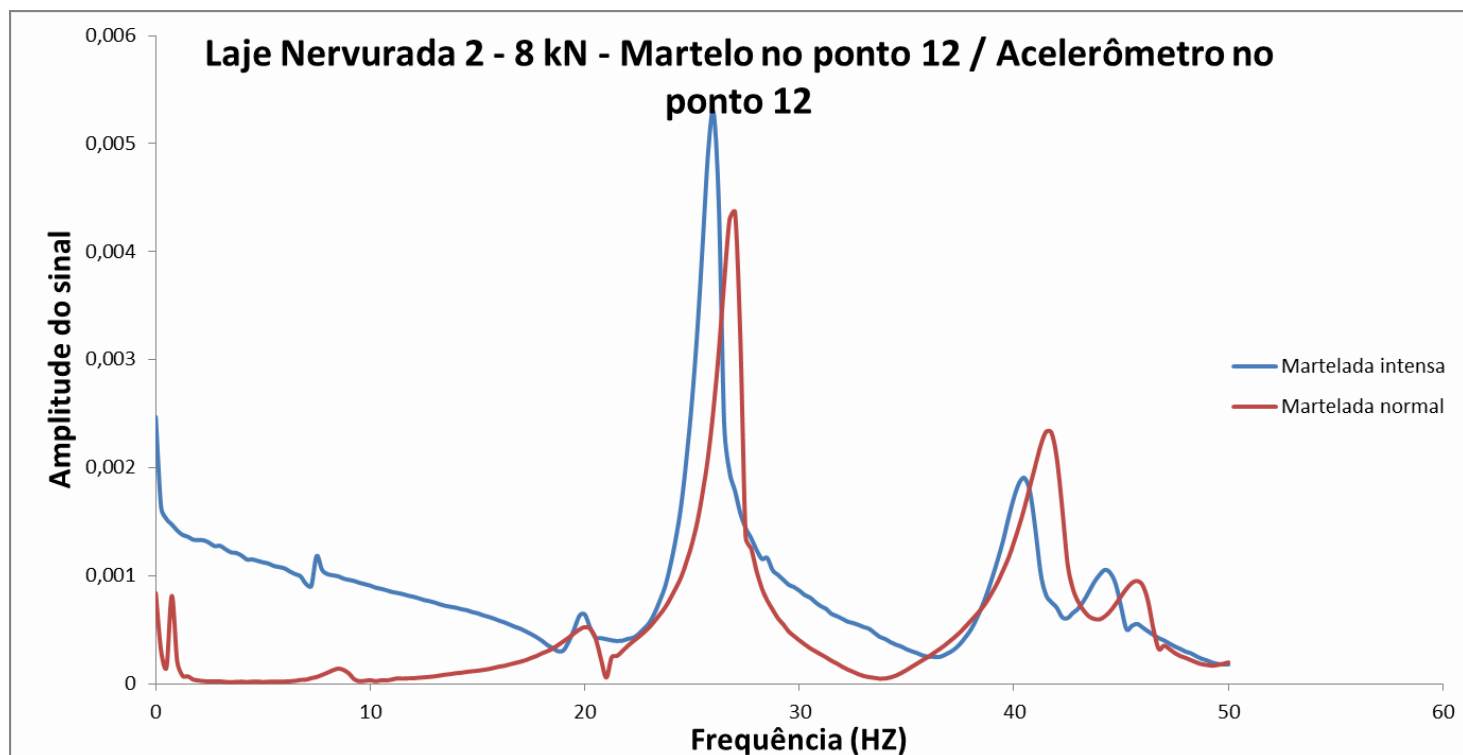


Figura 83 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 8kN.

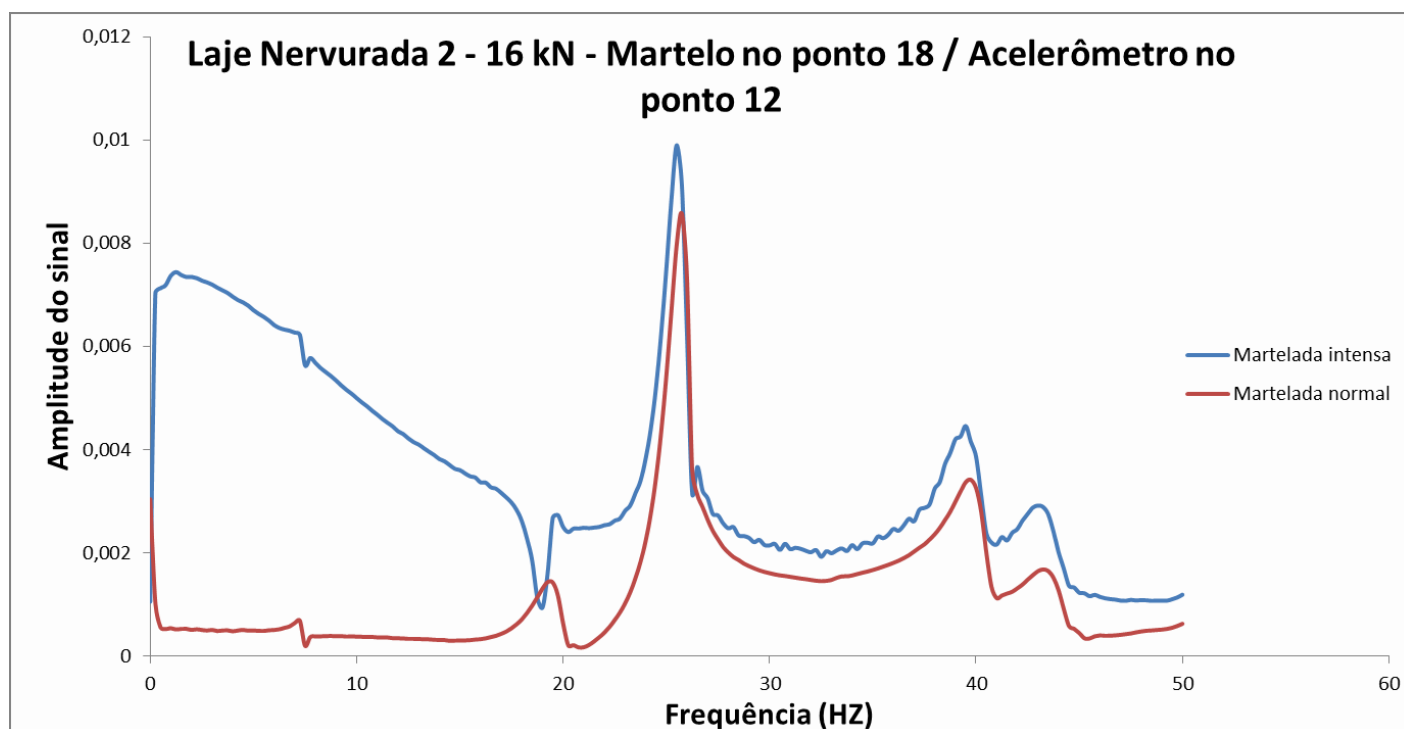


Figura 84 - Linearidade entre excitação no ponto 18 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 16kN.

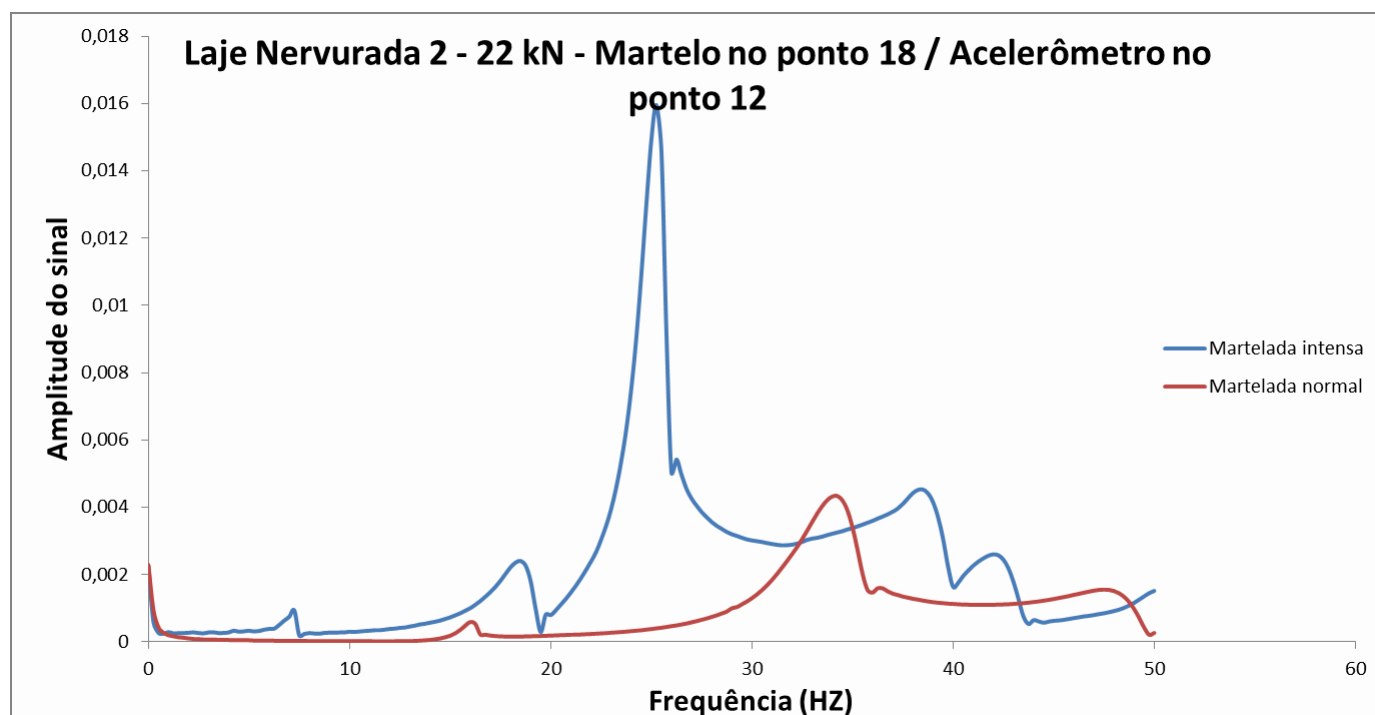


Figura 85 - Linearidade entre excitação no ponto 18 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 22kN.

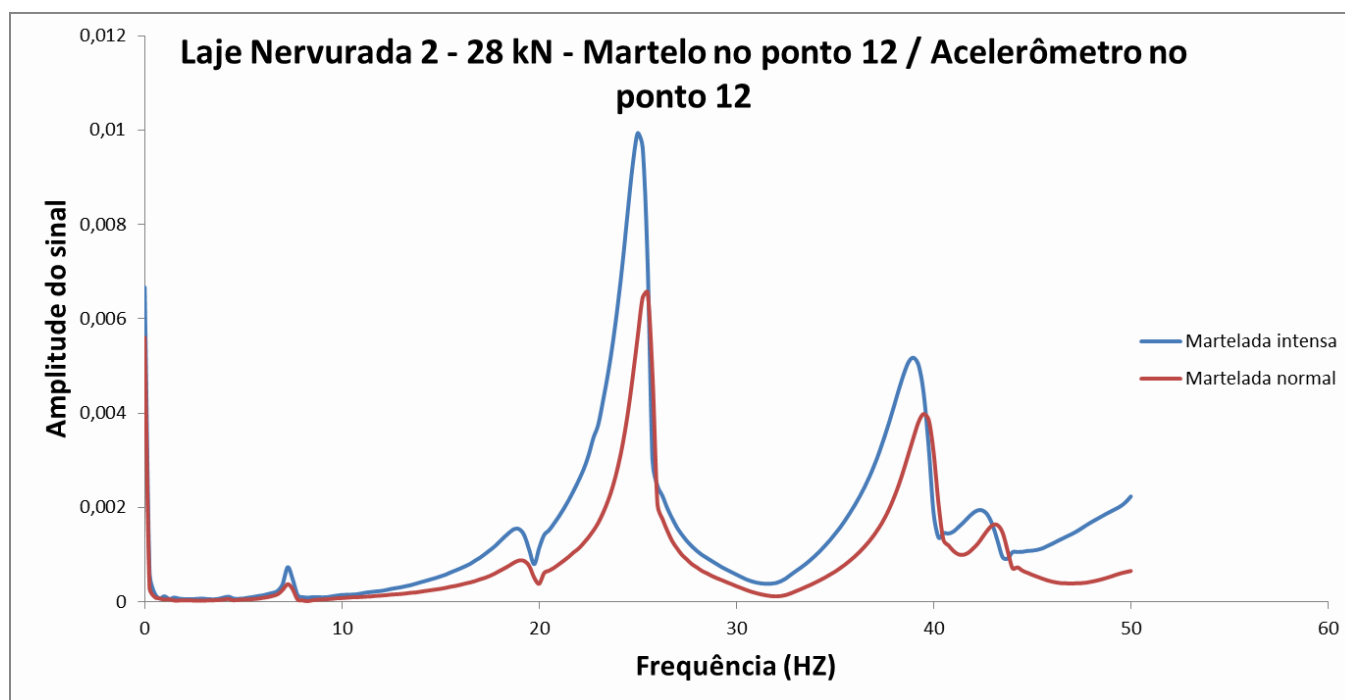


Figura 86 - Linearidade entre excitação no ponto 12 e resposta no ponto 12 para laje nervurada 2 – 28kN.

Analogamente ao ocorrido para as lajes maciças, as lajes nervuradas apresentaram similaridade nas FRF' em seus testes de reciprocidade e linearidade apenas para os estágios iniciais de carregamento. Todavia percebeu-se que, com exceção de alguns pontos, a diferença entre essas FRF's foi menor do que a observada para as lajes maciças nos estágios mais avançados de aplicação de carga. Sabe-se que as lajes nervuradas possuem maior rigidez que as maciças, isso pode ter sido um fator determinante para o ocorrido.

#### 4.4.2. Parâmetros modais pelo método do decaimento

Em processo análogo ao feito para as lajes maciças, utilizou-se o método do decaimento para obtenção dos parâmetros modais das lajes nervuradas. As Tabelas 31 à 40 mostram os resultados.

MODO 1							
NÓ		$\xi$	$\xi$ MÉDIO	DESVIO PAD. ( $\xi$ )	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	20	0,017	0,018	0,002	15,773	15,804	0,335
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	32	0,020			15,866		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	33	0,015			16,390		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	11	0,020			15,393		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	5	0,018			15,596		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 34 – Primeiro modo da laje nervurada 1 com 0kN

MODO 2							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	20	0,028	0,027	0,002	33,857	34,364	0,305
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	32	0,030			34,205		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	33	0,027			34,457		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,027			34,722		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	42	0,025			34,578		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 35 – Segundo modo da laje nervurada 1 com 0kN

MODO 1							
NÓ		$\xi$	$\xi$ MÉDIO	DESVIO PAD. ( $\xi$ )	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	4	0,017	0,018	0,000	15,386	15,103	0,206
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	32	0,018			14,902		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	11	0,019			15,022		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 36 – Primeiro modo da laje nervurada 1 com 16kN



MODO 2							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	4	0,023	0,027	0,004	33,857	34,079	0,377
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	32	0,033			33,770		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,026			34,609		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 37 – Segundo modo da laje nervurada 1 com 16kN.

MODO 2							
NÓ		$\xi$	$\xi$ MÉDIO	DESVIO PAD. ( $\xi$ )	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	1	0,024	0,022	0,001	32,556	32,558	0,098
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	7	0,022			32,458		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	8	0,021			32,502		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,022			32,717		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 38 – Segundo modo da laje nervurada 1 com 28kN

MODO 3							
NÓ		$\xi$	$\xi$ MÉDIO	DESVIO PAD. ( $\xi$ )	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	1	0,024	0,018	0,004	46,931	47,144	0,587
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	7	0,019			47,899		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	8	0,014			46,319		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	12	0,016			47,427		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 39 – Terceiro modo da laje nervurada 1 com 28kN

MODO 1							
NÓ		$\xi$	$\xi$ MÉDIO	DESVIO PAD. ( $\xi$ )	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	9	0,021	0,020	0,001	19,293	19,301	0,088
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	22	0,019			19,241		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	25	0,019			19,224		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	35	0,020			19,446		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 40 – Primeiro modo da laje nervurada 2 com 0kN.

MODO 2							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	9	0,014	0,013	0,001	25,900	25,956	0,081
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	22	0,013			25,917		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	25	0,013			25,911		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	35	0,013			25,938		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	42	0,012			26,115		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 41 – Segundo modo da laje nervurada 2 com 0kN.

MODO 1							
NÓ		$\xi$	$\xi$ MÉDIO	DESVIO PAD. ( $\xi$ )	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	25	0,019	0,021	0,003	19,378	19,438	0,111
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	16	0,020			19,379		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	22	0,019			19,364		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	31	0,026			19,630		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 42 – Primeiro modo da laje nervurada 2 com 28kN

MODO 2							
NÓ		ξ	ξ MÉDIO	DESVIO PAD. (ξ)	FREQUÊNCIA MÉDIA (Hz)	MÉDIA DAS FREQUÊNCIAS (Hz)	DESVIO PAD.
MARTELO	25	0,015	0,014	0,000	25,321	25,346	0,063
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	16	0,015			25,304		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	22	0,014			25,305		
ACELERÔMETRO	12						
MARTELO	31	0,014			25,455		
ACELERÔMETRO	12						

Tabela 43 – Segundo modo da laje nervurada 2 com 28kN

Em comparação com os resultados obtidos para as lajes maciças, as lajes nervuradas não mostraram acentuadamente a perda de rigidez através dos resultados dinâmicos. A maioria dos resultados apontou pequena diminuição da frequência e aumento do amortecimento. Os testes estáticos mostraram que a maior perda de rigidez das lajes nervuradas ocorreu já próxima a carga de colapso, fato que teve repercussão direta nos resultados dos testes modais. As Figuras 73 à 76 ilustram o caso descrito.

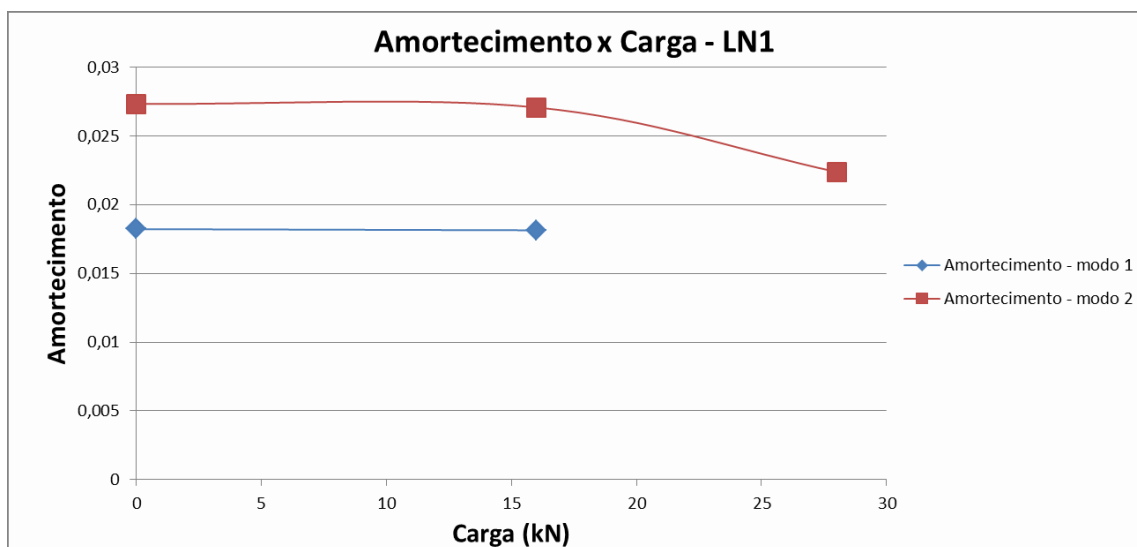


Figura 87 - Variação do amortecimento obtido pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga.

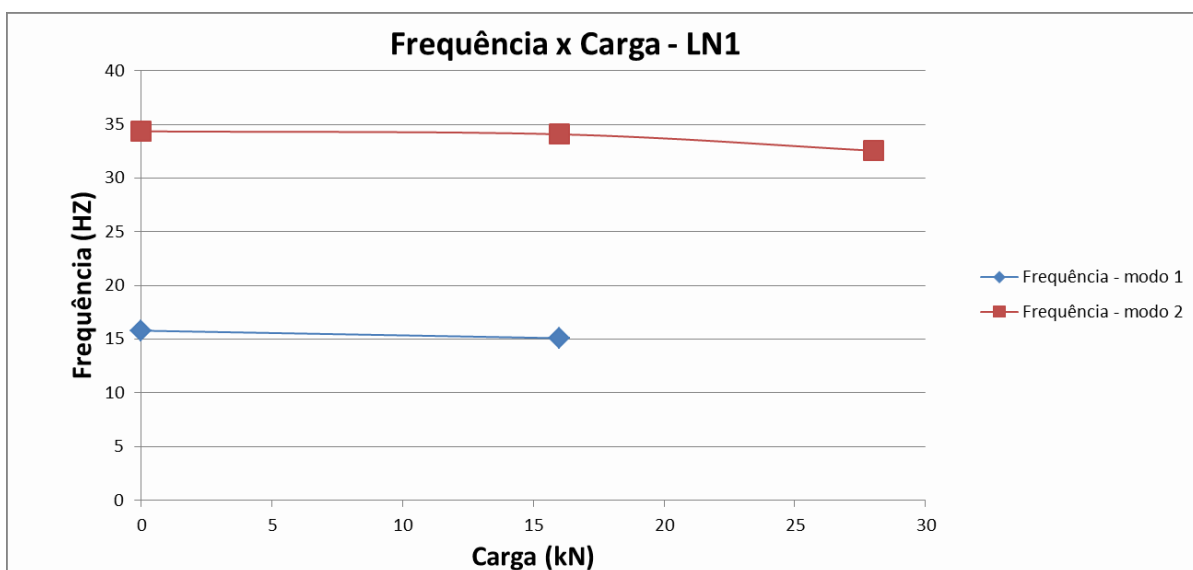


Figura 88 - Variação da frequência obtida pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga.

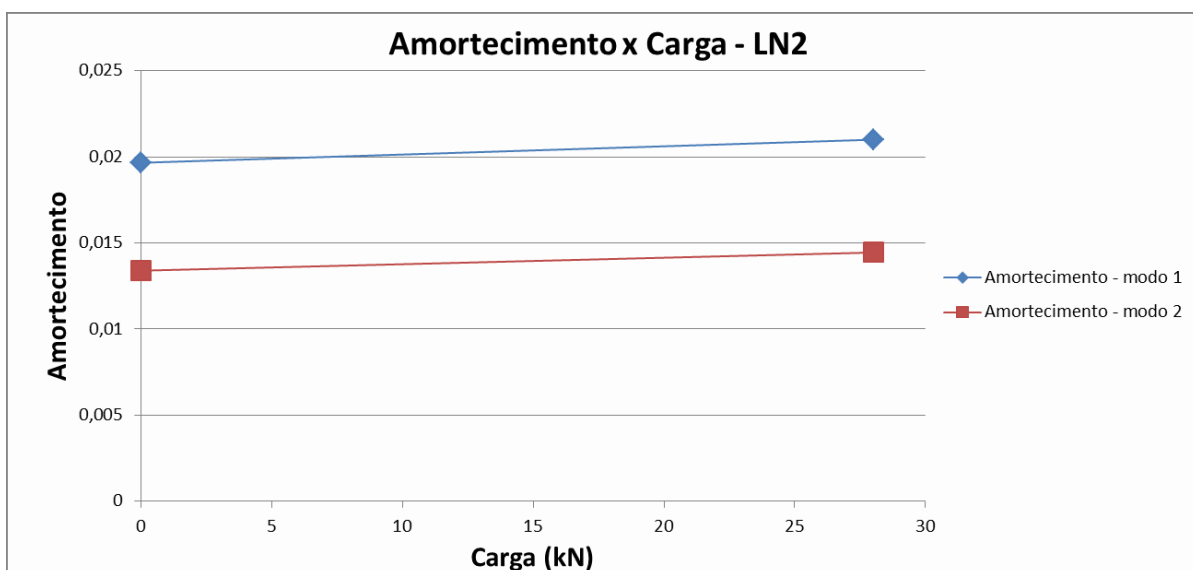


Figura 89 - Variação do amortecimento obtido pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga.

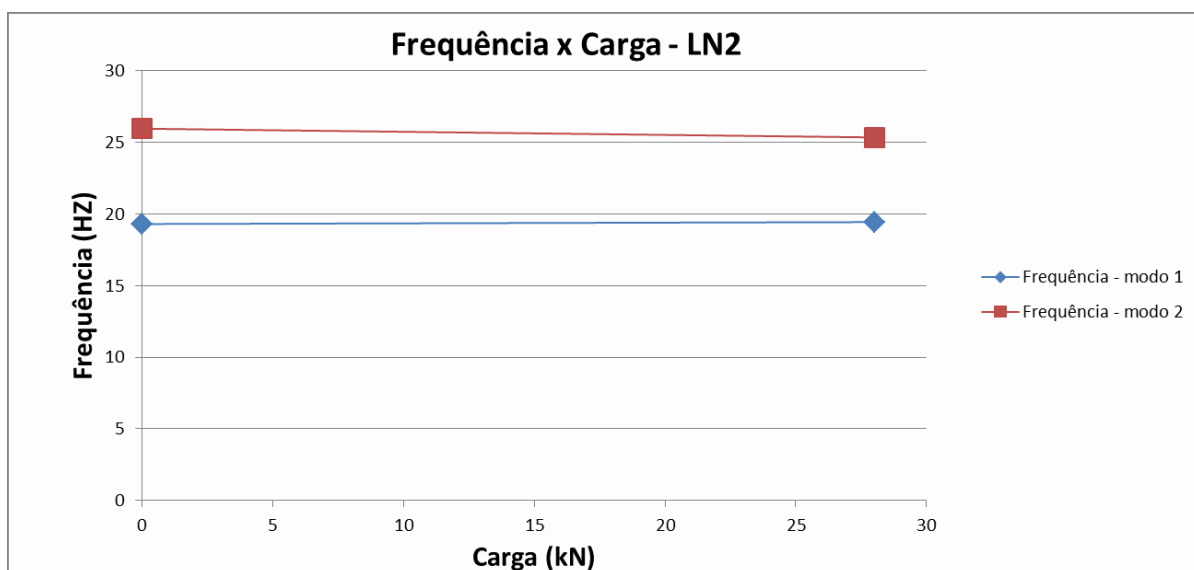


Figura 90 - Variação da frequência obtida pelo decaimento com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga.

#### 441. Parâmetros modais utilizando-se o StarModal

Igualmente ao processamento feito para as lajes maciças, fez-se uso do StarModal para obtenção dos modos e para o processamento considerando vários modos, bem como para os casos em que a FRF apresentou modos muito próximos, impossíveis de serem isolados para aplicação do método do decaimento. A Figura 77 ilustra um espectro visto no StarModal.

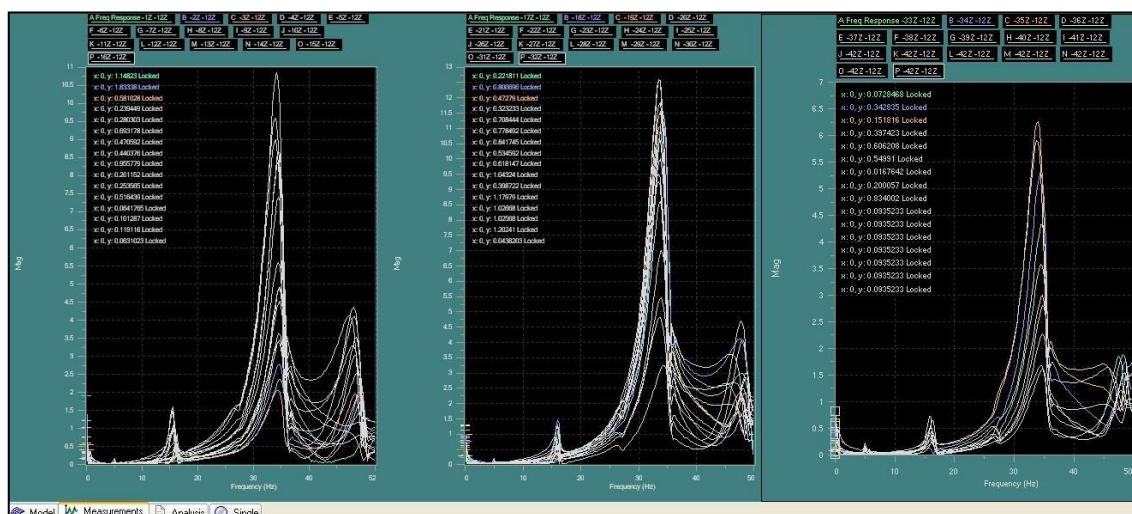


Figura 91 - Espectro no StarModal da laje nervurada 1 para a carga de 0 kN.

As Tabelas de 41 a 50 apresentam os resultados dos parâmetros modais obtidos com o auxílio do StarModal.

<b>LAJE NERVURADA 1 - Resultados obtidos do star modal - 0 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
15,7909 HZ	0,05 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
34,7545 HZ	1,20 HZ
Modo 3	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
49,5485 HZ	0,79 HZ

Tabela 44 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 0kN (Laje Sã)

<b>LAJE NERVURADA 1 - Resultados obtidos do star modal - 8 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
15,9309 HZ	0,52 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
34,5910 HZ	1,92 HZ

Tabela 45 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 8kN

<b>LAJE NERVURADA 1 - Resultados obtidos do star modal - 16 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
15,6262 HZ	0,42 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
33,7899 HZ	1,54 HZ

Tabela 46 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 16kN

<b>LAJE NERVURADA 1 - Resultados obtidos do star modal - 22 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
14,7328 HZ	0,91 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
33,5800 HZ	1,70 HZ
Modo 3	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
48,3539 HZ	2,03 HZ

Tabela 47 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 22kN

<b>LAJE NERVURADA 1 - Resultados obtidos do star modal - 28 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
13,0805 HZ	2,78 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
33,5800 HZ	1,70 HZ

Tabela 48 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 1 – 28kN

<b>LAJE NERVURADA 2 - Resultados obtidos do star modal - 0 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
15,0655 HZ	0,23 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
25,8412 HZ	0,46 HZ

Tabela 49 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 0kN (Laje sã)

<b>LAJE NERVURADA 2 - Resultados obtidos do star modal - 8 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
19,2927 HZ	1,51 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
26,1202 HZ	0,55 HZ
Modo 3	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
40,3866 HZ	1,09 HZ

Tabela 50 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 8kN

<b>LAJE NERVURADA 2 - Resultados obtidos do star modal - 16 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
19,9357 HZ	0,93 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
25,7826 HZ	0,50 HZ
Modo 3	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
39,6828 HZ	1,06 HZ

Tabela 51 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 16kN



<b>LAJE NERVURADA 2 - Resultados obtidos do star modal - 22 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
16,9430 HZ	4,09 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
25,6755 HZ	0,40 HZ
Modo 3	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
39,9524 HZ	1,67 HZ

Tabela 52 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 28kN

<b>LAJE NERVURADA 2 - Resultados obtidos do star modal - 28 kN</b>	
Modo 1	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
7,4301 HZ	0,15 HZ
Modo 2	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
19,4460 HZ	1,19 HZ
Modo 3	
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>AMORTECIMENTO</b>
25,5644 HZ	0,50 HZ

Tabela 53 - Resultados obtidos do StarModal para a laje nervurada 2 – 28kN

As frequências obtidas com o StarModal são compatíveis àquelas obtidas pelo método do decaimento. A elevada rigidez das lajes fez com que as frequências naturais se mantivessem, em geral, no mesmo patamar. Vale salientar que o primeiro modo da laje nervurada 2 medido após o ciclo de 28kN não apareceu nas medições anteriores nem no processamento por decaimento, o segundo e terceiro modo desse estágio correspondem ao primeiro e segundo modo dos estágios anteriores, respectivamente. As Figuras 78 à 81 mostram o comportamento dos parâmetros.

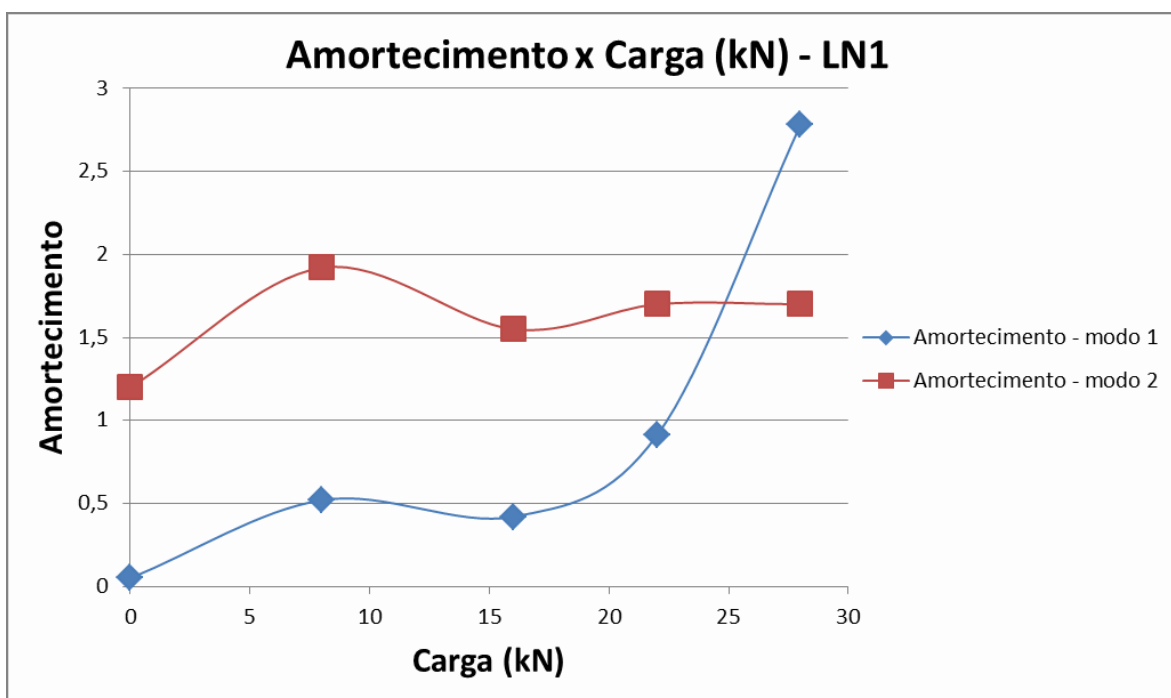


Figura 92 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga.

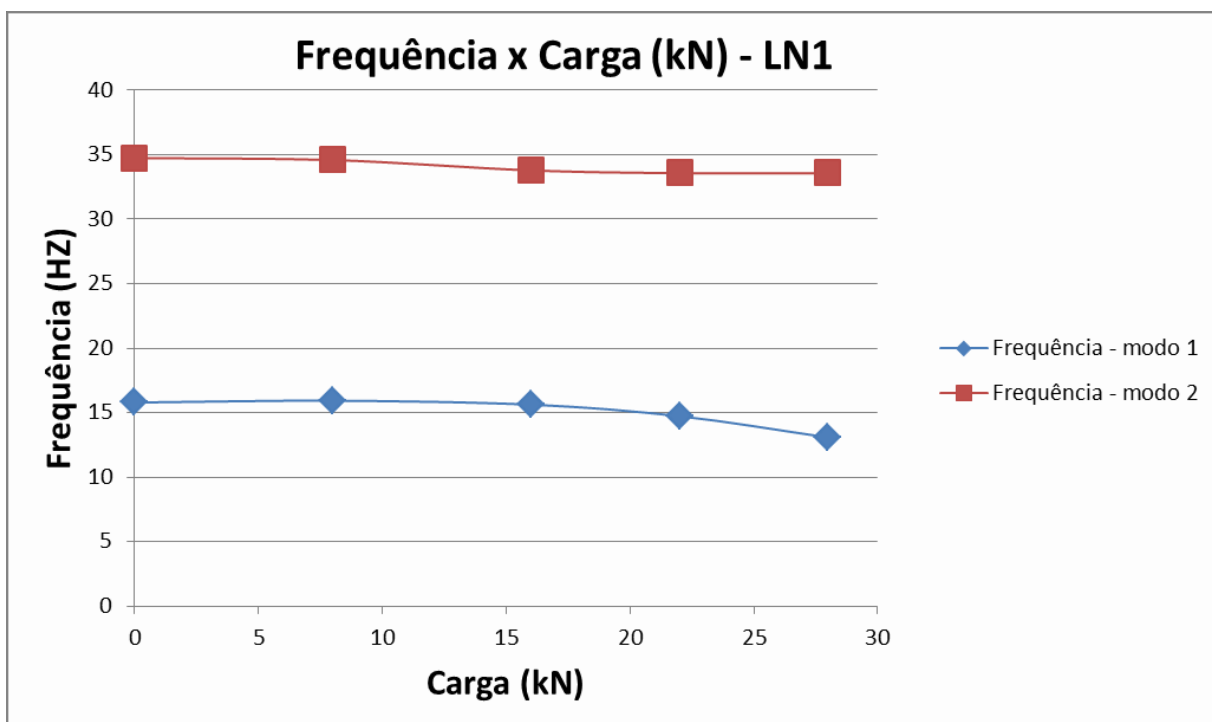


Figura 93 - Variação da frequência obtida pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 1 em cada estágio de carga.

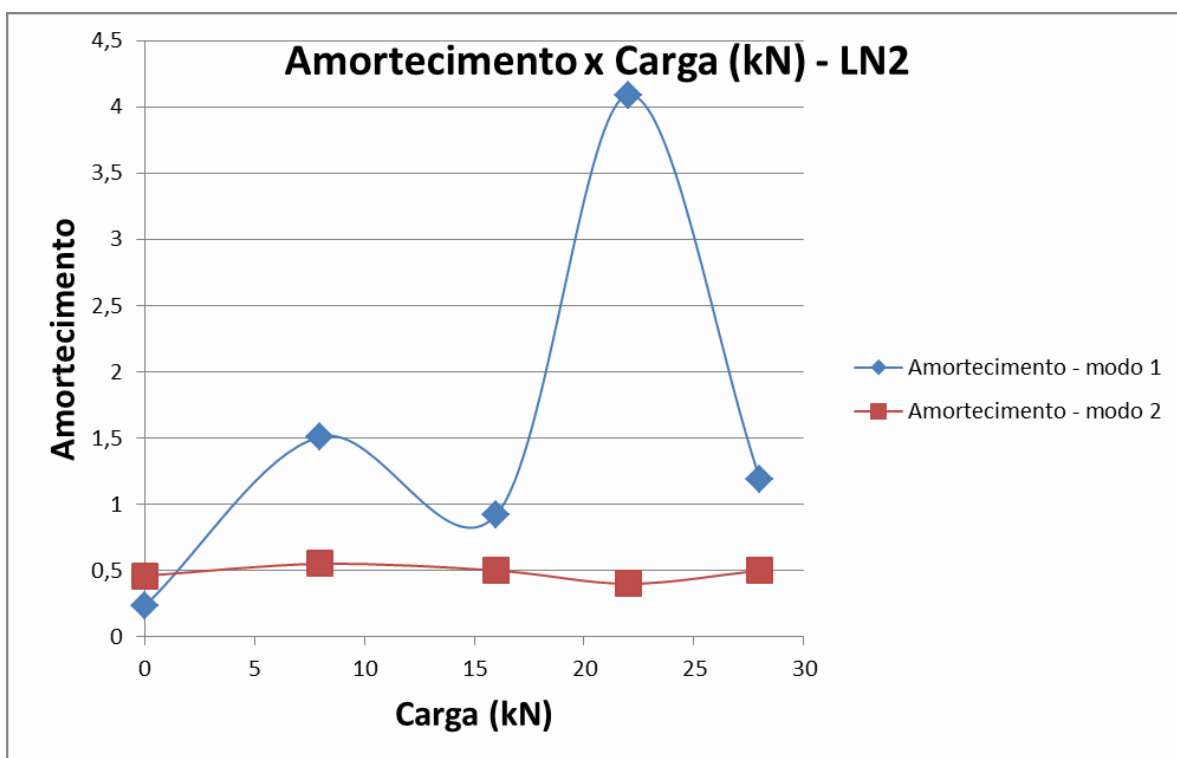


Figura 94 - Variação do amortecimento obtido pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga.

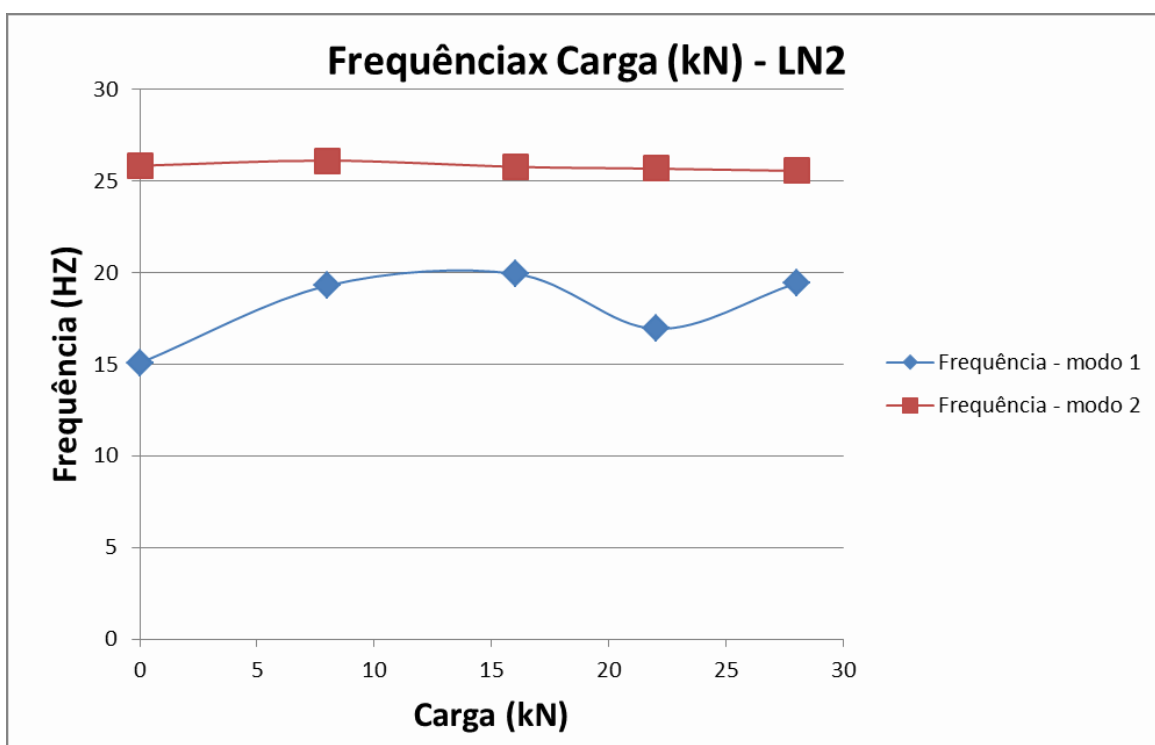


Figura 95 - Variação da frequência obtida pelo StarModal com o dano sofrido pela laje nervurada 2 em cada estágio de carga.

#### 442 Aplicação de índice de detecção de dano

Assim como aplicado para os resultados das lajes maciças, o índice de utilizado por Kim et al. (2005) também foi aplicado para as lajes nervuradas em seus primeiros modos. As Tabelas 51 e 52 trazem os resultados.

ÍNDICE DE DANO - LAJE NERVURADA 1 - MODO 1			
Carga Aplicada (KN)	Frequência Natural (HZ)	Cálculo do índice DI	
0	15,79	0,000	-
8	15,93	-0,018	DANO QUE PODE SER REPARADO
16	15,63	0,021	DANO QUE PODE SER REPARADO
22	14,73	0,130	DANO QUE PODE SER REPARADO
28	13,08	0,314	DANO QUE PODE SER REPARADO

Tabela 54 - Aplicação do índice de detecção de dano para a laje nervurada 1.

ÍNDICE DE DANO - LAJE NERVURADA 2 - MODO 1			
Carga Aplicada (KN)	Frequência Natural (HZ)	Cálculo do índice DI	
0	15,07	0,090	-
8	19,29	-0,493	DANO QUE PODE SER REPARADO
16	19,94	-0,594	DANO QUE PODE SER REPARADO
22	16,94	-0,151	DANO QUE PODE SER REPARADO
28 (MODO 2)	19,45	-0,517	DANO QUE PODE SER REPARADO

Tabela 55 - Aplicação do índice de detecção de dano para a laje nervurada 2.

Diante dos resultados encontrados, verificou-se que as lajes nervuradas praticamente não sofreram perda de rigidez ao serem submetidas aos ciclos de carga e descarga. O índice de detecção de dano apresentou resultados similares aos obtidos pelos testes estáticos, uma vez que as deflexões foram muito pequenas e a inclinação das curvas foram todas similares. Os resultados negativos não eram esperados e foram interpretados como ausência ou insignificante perda de rigidez nas lajes devido a uma possível acomodação do sistema de apoios. Vale salientar que o último estágio de carga

(28kN), acabou ficando muito distante da carga de ruptura, que foi de 44 kN, o que comprometeu a aplicação do índice.

As Figuras 82,83, 84 e 85 mostram as fissuras ocorridas na laje nervurada 1 após a aplicação das cargas de 8kN, 16kN, 22kN e 28kN respectivamente. Diante das fissuras encontradas nas lajes maciças, as fissuras das lajes nervuradas foram muito discretas, apresentando maior aumento de quantidade apenas no último estágio de carga.

Apesar da pouca perda de rigidez das lajes nervuradas, os resultados dos gráficos de deflexão, do índice de dano e as fotos das fissuras acabaram mostrando a mesma coisa, que as lajes não sofreram impactos significativos dos ciclos de carga e descarga.



Figura 96 - Fissura (em verde) surgida após a aplicação da carga de 8kN – LN1. Foto da laje vista de baixo.



Figura 97 - Fissura (em azul) surgida após a aplicação da carga de 16kN – LN1. Foto da laje vista de baixo.



Figura 98 - Fissuras (em preto) surgidas após a aplicação da carga de 22kN – LN1. Foto da laje vista de baixo.



Figura 99 - Fissuras (em vermelho) surgidas após a aplicação da carga de 28kN – LN1.  
Foto da laje vista de baixo.

#### 443. Tempo de trânsito

Analogamente ao medido para as lajes maciças, nas lajes nervuradas também foi feita a medida de tempo de trânsito. Excitação e acelerômetro estavam em extremidades opostas longitudinalmente distante 1,75m um do outro. O tempo de trânsito foi medido por cima da laje. Os valores estão nas Tabelas 53 à 62.

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00107000	0,00122908	0,00015060
M33a12	2	0,00117000		
M33a12	3	0,00126770		
M33a12	4	0,00117000		
M33a12	5	0,00146770		

Tabela 56 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 0 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00146770	0,00139328	0,00009474
M33a12	2	0,00127000		
M33a12	3	0,00146770		
M33a12	4	0,00136770		
M33a12	5	-		

Tabela 57 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 8 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00117000	0,00126708	0,00011839
M33a12	2	0,00117000		
M33a12	3	0,00146000		
M33a12	4	0,00126770		
M33a12	5	0,00126770		

Tabela 58 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 16 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00116770	0,00128856	0,00017607
M33a12	2	0,00146770		
M33a12	3	0,00126770		
M33a12	4	0,00146500		
M33a12	5	0,00107470		

Tabela 59 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 22 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00117200	0,00117200	0,00000000
M33a12	2	0,00117200		
M33a12	3	0,00117200		
M33a12	4	0,00117200		
M33a12	5	0,00117200		

Tabela 60 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 1 com 28 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00078100	0,00092750	0,00009767
M33a12	2	0,00097600		
M33a12	3	-		
M33a12	4	0,00097600		
M33a12	5	0,00097700		

Tabela 61 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 0 kN



NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00097600	0,00097620	0,00000045
M33a12	2	0,00097600		
M33a12	3	0,00097600		
M33a12	4	0,00097600		
M33a12	5	0,00097700		

Tabela 62 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 8 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00097600	0,00104167	0,00011287
M33a12	2	0,00097700		
M33a12	3	-		
M33a12	4	-		
M33a12	5	0,00117200		

Tabela 63 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 16 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00097700	0,00097675	0,00000050
M33a12	2	0,00097700		
M33a12	3	0,00097600		
M33a12	4	0,00097700		
M33a12	5	-		

Tabela 64 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 22 kN

NÓ	MEDIDA	TEMPO DE TRÂNSITO	MÉDIA	DESV. PADRÃO
M33a12	1	0,00097600	0,00097620	0,00000045
M33a12	2	0,00097600		
M33a12	3	0,00097600		
M33a12	4	0,00097600		
M33a12	5	0,00097700		

Tabela 65 - Tempo de trânsito medido na laje nervurada 2 com 28 kN

A partir dos resultados obtidos, não se pode concluir que o tempo de trânsito pode ser considerado parâmetro relevante para avaliação do estágio de fissuração das lajes nervuradas, como mostra a Figura 86.

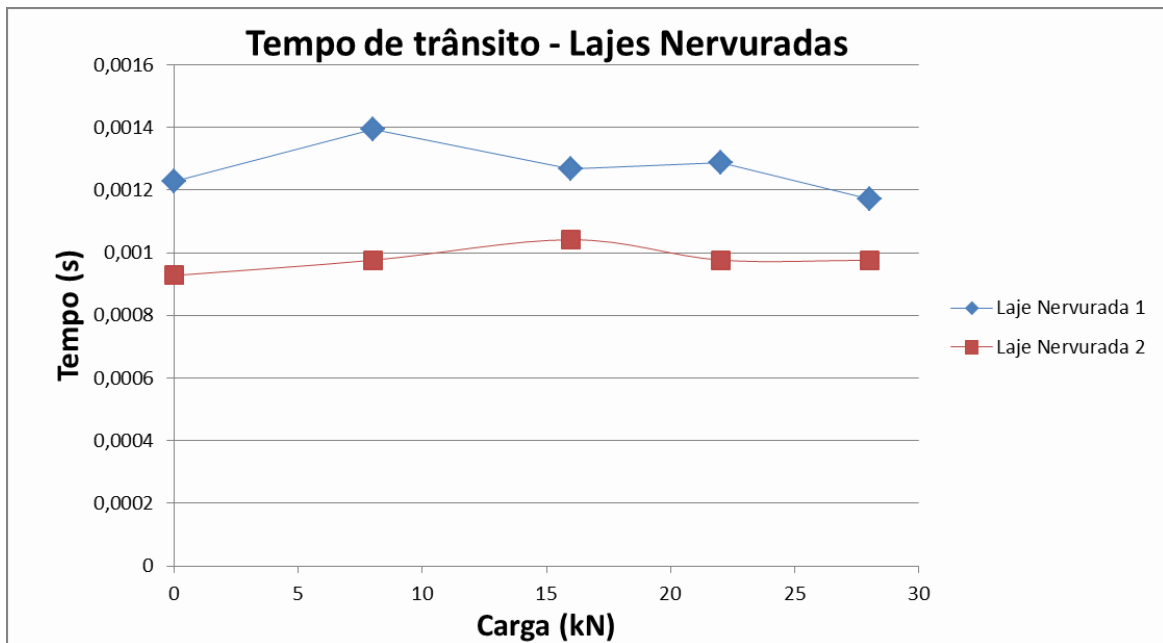


Figura 100 - Variação do tempo de trânsito com a carga aplicada nas lajes nervuradas.

## 5. CONCLUSÃO

Com o objetivo geral de investigar se testes dinâmicos são eficazes na avaliação do estado de fissuração de estruturas, quatro lajes convencionais (duas maciças e duas nervuradas) foram testadas.

Como resultados gerais dos ensaios estáticos, verificou-se que as lajes saem do regime linear durante a aplicação do segundo estágio de carga (16kN), em que o estágio de fissuração já estava significativo.

Os resultados encontrados decorrentes dos testes modais para as lajes maciças ratificaram o que foi mostrado pelos gráficos das deflexões. De um modo geral, as frequências naturais decresceram à medida que os estágios de carga aumentaram. Os resultados obtidos pelo método do decaimento foram compatíveis com os obtidos através do software StarModal.

Os períodos naturais foram utilizados para aplicação do índice de dano utilizado por Kim et al. (2005). O índice apontou que, possivelmente, as lajes maciças poderiam ser reparadas até após a aplicação do estágio de 8kN, o que foi também indicado pelos testes estáticos e pelas fotos dos estágios de fissuração.

Ainda no que diz respeito às lajes maciças, foi feita uma análise baseada no comportamento da inclinação das curvas das frequências médias ao longo do decaimento em cada estágio de carga. Observou-se que os coeficientes angulares aumentavam à medida que aumentava o estágio de fissuração, resultado este condizente com os outros testes realizados, porém não foi encontrado nenhum trabalho com este tipo de análise na literatura.

As lajes nervuradas foram submetidas aos mesmos testes dinâmicos e estáticos das lajes maciças. Os testes estáticos mostraram a elevada rigidez das lajes nervuradas, causada pela elevada espessura, já que as lajes precisariam ser no mínimo 4cm mais espessas que as caixas plásticas, segundo a NBR 6118:2003. Foram mostradas também, que as curvas de deflexão só mudaram bruscamente de inclinação durante a aplicação do último ciclo de carga o que evidencia a elevada rigidez das lajes.

No que tange aos testes modais, as lajes nervuradas não apresentaram diminuição gradual das frequências naturais à medida que foram submetidas aos ciclos de carga e descarga devido a pouca carga aplicada em relação a sua carga de ruptura.

Nesse sentido, o índice utilizado por Kim et al. (2005) acabou não mostrando necessidade de reparação das lajes, e as figuras mostraram que as fissuras surgiram de maneira muito discreta.

Comparando os resultados encontrados pelos dois tipos de lajes, as maciças apresentaram maior sensibilidade aos ensaios propostos, devido a sua menor rigidez (menor espessura e menor massa); estas puderam realmente mostrar a que os testes modais podem ser uma alternativa para averiguar o estágio de degradação de estruturas em geral. O índice de detecção de dano veio para validar os resultados encontrados e um novo índice baseado na inclinação da curva da frequência média ao longo do decaimento foi apresentado como uma novidade que pode vir a ser explorada em trabalhos futuros.

Como sugestão para continuidade da pesquisa fica a montagem de duas outras lajes, dessa vez com treliças pré-moldadas e rigidezes similares às lajes maciças, para somar aos trabalhos já existentes. Sugere-se também, a modelagem computacional dos elementos estruturais experimentados para comparação dos parâmetros obtidos numérica e experimentalmente.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelkrim, S., Abdelmadjid, H., Megnounif, A., Abdelmadjid, C., Souad, B. (2011) “Crack detection in concrete beams using experimental modal data.” *8<sup>th</sup> International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011*, Leuven, Belgium.
- ABNT. NBR NM 33- 1998. *Amostragem de Concreto Fresco*. 1998. 7p.
- ABNT. NBR 5738. *Modelagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. 1994, 9p.
- ABNT. NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. 2003.
- ABNT. NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. 2014.
- Allemang, R. J. (2003) “The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse” *Journal Sound and Vibration*, 37(8), 14-21.
- Carvalho, R. C., Filho, J. R. F. *Cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado segundo a NBR 6118:2003*. 3<sup>a</sup> edição, Volume 1, São Carlos, 2013.
- Carvalho, R. C., Pinheiro, L. M. *Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado*. 2<sup>a</sup> edição, Volume II, São Carlos, 2013.
- Chaudhari, C. C., Gaikwad, J. A., Bhanuse, V. R., Kulkarni J. V. (2014) “Experimental investigation of crack detection in cantilever beam using vibration analysis.” *First International Conference on Networks & Soft Computing*, Guntur, Andhra Pradesh, India.
- Chellini, D., Roeck G. D., Nardini L., Salvatore W. (2010) “Damage analysis of a steel-concrete composite frame by finite element model updation.” *Journal of Constructional Steel Research*, 66: 398–411.
- Commanducci, G., Ubertini, F., Materazzi, A. L. (2015) “Structural health monitoring of suspension bridges with features affected by changing wind speed.” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 141, 12-26.
- Costa, B. J. A., Magalhães, F., Cunha, A. Figueiras, J. (2014) “Rehabilitation assessment of a centenary steel bridge based on modal analysis” *Engineering Structures* 56, 260-272.
- Curadelli, R. O., Riera, J. D.; Ambrosini, D.; Amani, M. G. (2008) “Damage detection by means of structural damping identification” *Engineering Structures*, 30, 3497-3504.
- Curie, D., Petrie, N., Mao, L., Lu, Y. (2012), “A benchmark study of dynamic damage identification of plates” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering and Computational Mechanics* 165 (2), 103-118.

Dworakowski I, Ziemowit; Ambrozinski, Lukasz; Mendrok, Krzysztof. "Damage localization in plates with use of the procedure based on Modal Filtration." *Journal of Physics: Conferences Series*, 628, 012028, 2015.

Ewins, D. J. *Modal testing: Theory and Practice*. First ed. London, England, 1984.

Filho, A. C. *Projeto de lajes maciças de concreto armado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Gao, Hai-yang; Guo, Xing-lin; Ouyang, Huajiang; Yang, Xiu-ming. (2015) "Multi-damage localization in plate structure using frequency response function-based indices." *Journal of Physics: Conferences Series*, 628, 012004.

Hashim, H., Ibrahim, Z., Razak, H. A. (2013), "Dynamic characteristics and model updating of damaged slab from ambient vibration measurements." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 46 (4), 1371-1378.

Hermez, François M; Strull, Christopher J. (2012) "On the Legitimacy of Model Calibration in Structural Dynamics. Topics in Model Validation and Uncertainty Qualification." *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, Vol. 4, 95-108

Hsieh, K.; Halling, M.; Barr, P.; Robinson, M. (2008) "Structural Damage Detection Using Dynamic Properties Determined from Laboratory and Field Testing." *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 22 (4), 238-244.

Hu, Chuanshuang; Xiao, Min; Zhou, Haibin; Wen, Wei; Yun, Hong. (2011) "Damage detection in of wood beams using the differences in local modal flexibility." *The Japan Wood Research Society*, 57, 479-483.

Ismail, Zubaidah; Ong, Zhi Chao. (2012) "Honeycomb damage detection in a reinforced concrete beam using mode shape regression." *Measurement*, 45, 950-959, 20

Kelly, S. Graham. *Mechanical Vibrations: Theory and Applications*. Cengage Learning, 2012.

Kim, T.-H.; Lee, K.-M.; Chung, Y.-S.; Shin, H.M. (2005) "Seismic damage assessment of reinforced concrete bridge columns" *Engineering Structures*, 27 (11), 576-592.

Martins, N., Caetano, E., Diord, S., Magalhães, F., Cunha, A. (2014) "Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response." *Engineering Structures* 56, 80-94.

Park Y. J., Ang A. H. S., Wen Y. K. (1987) "Damage-limiting aseismic design of buildings" *Earthquake Spectra* 3(1):1-26.

Pastor, M., Binda, M. Harcarik, T. (2012) "Modal Assurance Criterion." *Procedia Engineering* 48, 543 – 548

- Pimentel, R. L., Ferreira, E. T., Melo, A. B., Guedes, T. O. (2013) “Avaliação de capacidade de carga de lajes pré-moldadas utilizando testes modais” *IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas CINPAR 2013*, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
- Ratcliffe, C. P. (1997) “Damage detection using a modified laplacian operator on mode shape data.” *Journal Sound and Vibration* 204(3), 505-517.
- Rao, Singiresu S. (2011) *Mechanical Vibrations* - Addison-Wesley Publishing Company - World Student Series - Estados Unidos.
- Rodriguez-Gomez S., Cakmak A., S. (1990) “Evaluation of seismic damage indices for reinforced concrete structures.” Report No NCEER 90-0022, *National Center for Earthquake Engineering Research*, State University of New York at Buffalo.
- Rytter, A. (1993) “Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures.” *Fracture and Dynamics*, R9314 (44).
- Rucevskis, S., Chate, A. (2013), “Damage identification in a plate-like structure using modal data.” *Aviation* 17 (2), 45-51.
- Stone W. C., Taylor A. W. (1993) “Seismic performance of circular bridge column designed in accordance with AASHTO/CALTRANS standards” *NIST Building Science Series*, vol. 170. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and Technology.
- Xu, Y., Huang, Q., Zhan, S., Su, Z., Liu, H. (2014) “FRF-based structural damage detection of controlled buildings with podium structures: Experimental investigation.” *Journal of Sound and Vibration*, 333, 2762-2775.
- Williams M. S., Villemure I., Sexsmith R. G. (1997) “Evaluation of seismic damage indices for concrete elements loaded in combined shear and flexure” *ACI Structural Journal* 94(3), 315–22.

## ANEXO A – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES MACIÇAS

Para o dimensionamento das lajes maciças foram considerados os mesmo carregamentos atuantes e dimensões consideradas por Pimentel et al. (2013) no dimensionamento das lajes pré-moldadas, uma vez que a ideia é comparar apenas a influência do tipo de laje na variação dos parâmetros modais. O roteiro de cálculo foi feito segundo Carvalho (2013), com auxílio de material didático de Filho (2011), tudo segundo a NBR 6118:2013, que era a norma vigente no período do dimensionamento.

As lajes foram dimensionadas como armadas em uma direção, pois possuem seu sistema de apoio contendo duas bordas livres e duas bordas apoiadas, conforme a Figura 101.

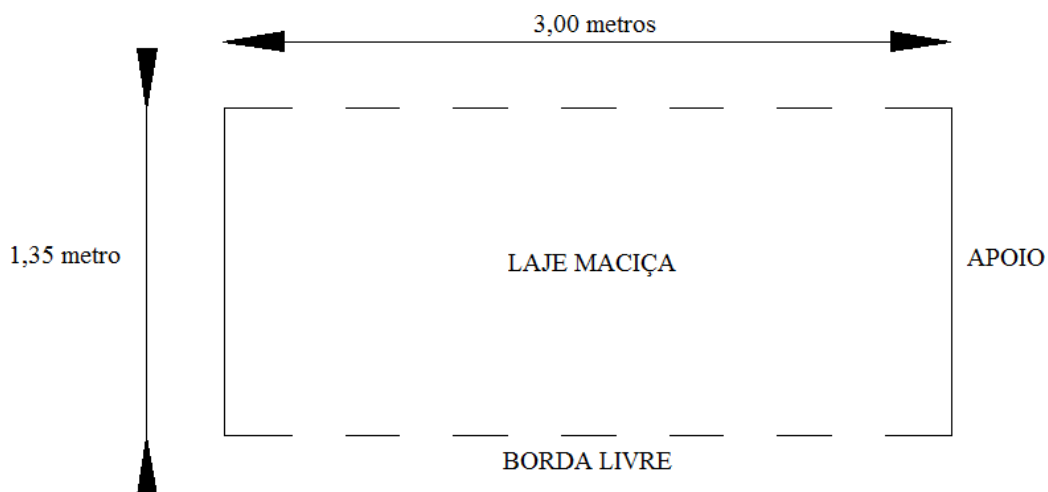


Figura 101 – Laje armada em uma direção

### DADOS:

- O Peso específico do concreto armado considerado foi de  $25 \text{ KN/m}^3$ , pois é o valor recomendado pela NBR 6118:2003.
- O Comprimento do vão é de 2,85 m, uma vez que se considerou a distância entre o centro de cada apoio, ocasionando uma perda de 7,5 cm em cada lado da laje.
- Resistência característica do concreto ( $F_{ck}$ ): 25 MPa



- K (coeficiente que depende da vinculação e da relação entre os vãos da laje e serve para determinação das flechas, nesse caso trata-se de laje armada em uma direção bi-apoiada):  $K = 1,3$  (FILHO, 2011)
- b: 1,00 m
- Cobrimento (Classe I): 2,00 cm
- Coeficiente de segurança do concreto ( $\gamma_c$ ): 1,4
- Coeficiente de segurança do aço ( $\gamma_s$ ): 1,15
- A Carga accidental e o peso da cobertura foram iguais aos utilizados por Pimentel et al. (2013) para o dimensionamento das lajes pré-moldadas e são de 0,50 KN/m<sup>2</sup> e 0,70 KN/m<sup>2</sup> respectivamente.
- Espessura da laje adotada: 8,00 cm
- Resistência de cálculo do concreto:  $F_{cd} = (25 \text{ MPa} / 1,4) = 17,85 \text{ MPa}$
- Resistência de cálculo do aço:  $F_{yd} = (500 \text{ MPa} / 1,15) = 434,78 \text{ MPa}$

#### DIMENSIONAMENTO:

O carregamento da laje referente ao peso próprio do concreto por metro quadrado de laje foi calculado multiplicando-se o peso específico do concreto armado de 25 KN/m<sup>3</sup> pela espessura da laje adotada que é de 8,0cm.

$$\text{Peso próprio} = 25 \text{ KN/m}^3 \cdot 0,08\text{m} = 2,00 \text{ KN/m}^2$$

$$\text{Carga distribuída} = 2,00 \text{ KN/m}^2 + 0,5 \text{ KN/m}^2 + 0,7\text{KN/m}^2 = 3,20 \text{ KN/m}^2$$

Desse modo, o carregamento da laje se dá conforme Figura 102.

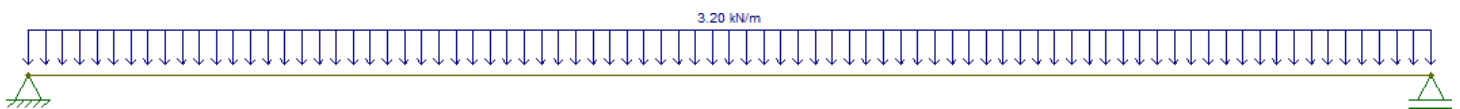


Figura 102 - Carregamento distribuído na laje maciça

O momento máximo é dado por:

$$M_v = 3,20 \text{ KN/m}^2 \cdot (2,85 \text{ m})^2 / 8 = 3,25 \text{ KN m/m}$$

As reações de apoio são iguais em ambos os apoios:

$$R_a = R_b = 3,20 \text{ KN/m}^2 \cdot 2,85 \text{ m} / 2 = 4,56 \text{ KN /m}$$

O momento de cálculo então é dado pelo momento máximo multiplicado pelo coeficiente de segurança do concreto:

$$M_d = 3,25 \text{ KN/m}^2 \cdot 1,4 = 4,55 \text{ KN/m}^2$$

O módulo de elasticidade secante do concreto é obtido através da equação:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 (f_{ck})^{1/2} \quad (4)$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot (25\text{MPa})^{1/2} = 23800 \text{ MPa}$$

O valor médio para resistência a tração do concreto é dado por:

$$F_{ctm} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad (5)$$

$$F_{ctm} = 0,3 \cdot (25\text{MPa})^{2/3} = 2,56 \text{ MPa}$$

Obteve-se o momento de fissuração através da equação 6.

$$M_r = 0,5 \cdot F_{ctm} \cdot b \cdot (h)^2 \quad (6)$$

$$M_r = (0,25 \cdot (2,56 \text{ MPa})/10 \cdot 100 \text{ cm} \cdot (8 \text{ cm})^2)/100 = 4,10 \text{ KN m/m}$$

O momento de serviço é dado por:

$$M_a = (3,25 \text{ KN/m}^2 \cdot (2,85 \text{ m})^2)/2 = 3,30 \text{ KN m/m}$$

Então, temos que  $M_a < M_r$ .

O momento de inércia corresponde a:

$$I_{eq} = 100 \text{ cm} \times (8 \text{ cm})^3/12 = 4266,67 \text{ cm}^4$$

A flecha de curta duração é dada pela equação 7.

$$f(t = 0) = k \frac{q \cdot l^4}{E_{cs} \cdot I_{eq}} \quad (7)$$

$$f(t=0) = (1,3 \times 3,25 \text{ KN m/m} \cdot (2,85 \text{ cm})^4 / (23800 \text{ MPa} \cdot 4266,67 \text{ cm}^4)) \cdot 10^4 = 0,027 \text{ cm}$$

A flecha de longa duração é dada pela equação 8.

$$f(t = \infty) = 2,32 \cdot f(t = 0) \quad (8)$$

$$f(t=\infty) = 2,32 \cdot 0,027 \text{ cm} = 0,064 \text{ cm}$$

Obteve-se a flecha admissível pela equação 9.

$$f_{adm} = l/200 \quad (9)$$

$$f_{adm} = 285 \text{ cm}/200 = 1,14 \text{ cm}$$

E para iniciar o dimensionamento da armadura necessita-se da altura útil, dada

por:

$$d \text{ (Altura útil)} = 8,00 \text{ cm} - 2,00 \text{ cm} - 0,50 \text{ cm} = 5,50 \text{ cm}$$

Encontra-se então o “x”, para então determinação da área de aço ( $A_s$ ) utilizando as equações (9) e (10)

$$x = 1,25 \cdot d \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{m d}{0,425 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2}} \right) \quad (10)$$

$$A_s = \frac{0,68 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{f_{yd}} \quad (11)$$

$$x = 1,25 \cdot (1 - (1 - 4,55 \text{ KN/m}^2 / (0,425 \cdot 1,785 \times 100 \text{ cm} \cdot (5,50 \text{ cm})^2))^{1/2} = 0,719 \text{ cm}$$

$$x/d = 0,719 \text{ cm} / 5,50 \text{ cm} = 0,131$$

$$A_s = 0,68 \cdot 1,785 \cdot 100 \text{ cm} \cdot 0,719 \text{ cm} / 43,478 = 2,007 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Verificou-se que a área de aço ( $A_s$ ) é maior que a área de aço mínima ( $A_{smin}$ ):

$$A_{smin} = 0,15\% \cdot 100 \text{ cm} \cdot 8,00 \text{ cm} = 1,20 \text{ cm}^2/\text{m} < A_s$$

Adotou-se então a área de aço ( $A_s$ ) para armadura principal. Foi utilizado 15 barras de aço com espessura de 5.0mm espaçadas a cada 9cm.

Depois de feitas as verificações, adotou-se a armadura de distribuição mínima equivalente a 0,9 cm<sup>2</sup>/m, utilizando-se 14 barras de espessura 5.0mm espaçadas a cada 22cm.

## ANEXO B – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES NERVURADAS

Para o dimensionamento das lajes nervuradas foram considerados os mesmo carregamentos atuantes e dimensões consideradas por Pimentel et al. (2013) no dimensionamento das lajes pré-moldadas, bem como no dimensionamento das lajes maciças já descritas. O cálculo foi feito utilizando o roteiro de Carvalho (2013) e segundo os preceitos da NBR 6118:2003, que era a norma vigente no período do dimensionamento.

Assim como as outras lajes, as nervuradas foram dimensionadas como armadas em uma direção, pois possuem seu sistema de apoio contendo duas bordas livres e duas bordas apoiadas.

### DADOS:

- O Peso específico do concreto armado considerado foi de  $25 \text{ KN/m}^3$ , pois é o valor recomendado pela NBR 6118:2014.
- O Comprimento do vão é de 2,85 m, uma vez que se considerou a distância entre o centro de cada apoio, ocasionando uma perda de 7,5 cm em cada lado da laje.
- Resistência característica do concreto ( $F_{ck}$ ): 25 MPa
- Cobrimento (Classe I): 2,00 cm
- Coeficiente de segurança do concreto ( $\gamma_c$ ): 1,4
- Coeficiente de segurança do aço ( $\gamma_s$ ): 1,15
- A Carga accidental e o peso da cobertura foram iguais aos utilizados por Pimentel et al. (2013) para o dimensionamento das lajes pré-moldadas e são de  $0,50 \text{ KN/m}^2$  e  $0,70 \text{ KN/m}$  respectivamente.
- Largura das nervuras ( $b_w$ ): 7 cm
- Altura da capa de concreto ( $h_f$ ): 4,5 cm
- Distância livre entre as nervuras ( $a$ ):
- Resistência de cálculo do concreto:  $F_{cd} = (25 \text{ MPa} / 1,4) = 17,85 \text{ MPa}$
- Resistência de cálculo do aço:  $F_{yd} = (500 \text{ MPa} / 1,15) = 434,78 \text{ MPa}$

### DIMENSIONAMENTO:

Para calcular o peso próprio do concreto por nervura basta medir a área de concreto conforme Figura 103 e multiplicar pelo peso específico do concreto:

Peso próprio =  $(0,07\text{m} \cdot 0,215\text{m} + 0,65\text{m} \cdot 0,045\text{m} + 0,025\text{m} \cdot 0,26\text{m}) \cdot 25$   
 $\text{kN/m}^2 = 1,27 \text{ kN/m/nervura}$

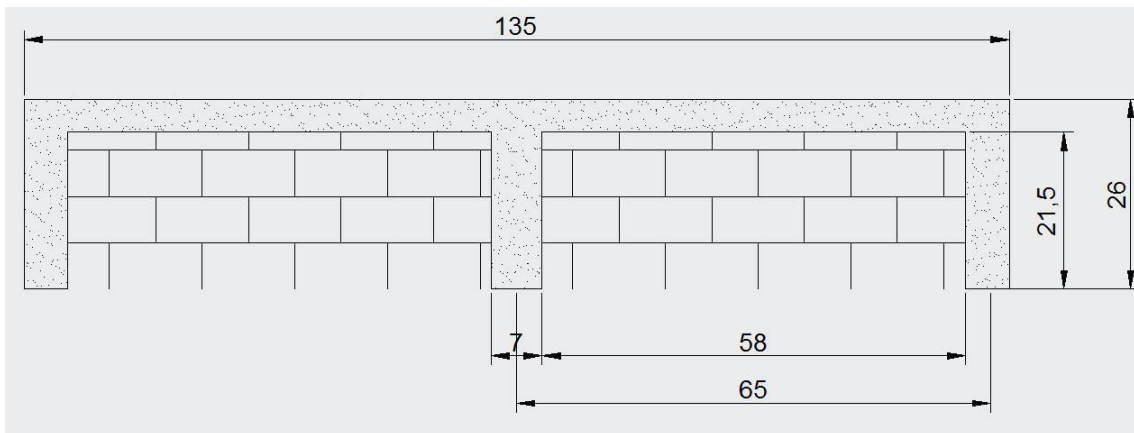


Figura 103 – Detalhe da laje nervurada em corte

A carga acidental e o peso da cobertura calculado por nervura é de:

Carga acidental =  $0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,65 \text{ m/nervura} = 0,325 \text{ kN/m/nervura}$

Peso da cobertura =  $0,7 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,65 \text{ m/nervura} = 0,455 \text{ kN/m/nervura}$

Segundo a NBR 6118:2003 a largura colaborante foi encontrada considerando a nervura como seção T:

$$bf = bw + 2(b1) \quad (12)$$

Onde,

$bw = 7 \text{ cm}$  (largura da alma da seção)

$b1 = \text{menor valor entre } (0,10 \cdot \text{comprimento do vão}) \text{ e } (a \text{ distância livre entre as nervuras} \cdot 0,5)$

$b1 = \text{menor valor entre } 28,5\text{cm} \text{ e } 29\text{cm}$

$b1 = 28,5\text{cm}$

Então,

$bf = 7\text{cm} + 2 \cdot 28,5\text{cm} = 64\text{cm}$

O cálculo do máximo momento fletor atuante em uma nervura é dado por:

$M = 2,05 \text{ kN/m/nervura} \cdot (2,85\text{m})^2/8 = 2,08 \text{ kN/m/nervura}$

Usando as formulas para o cálculo de armaduras em elementos fletidos encontradas em Carvalho (2013), temos o sistema de equações:

$$KMD = Md/(bf \cdot d^2 \cdot fcd) \quad (13)$$

$$KMD = 0,68 \cdot (KX) - 0,272 \cdot (KX)^2 \quad (14)$$

$$KZ = 1 - 0,4 \cdot KX \quad (15)$$

$$x = KX \cdot d \quad (16)$$

$$As = Md / (KZ \cdot d \cdot fcd) \quad (17)$$

A partir das equações 12, 13, 14, 15 e 16 obteve-se:

$$KMD = 0,00447$$

$$KX = 0,00659$$

$$KZ = 0,99763$$

$$x = 0,0016m < 4,5cm \text{ (Linha Neutra passa na mesa)}$$

$$As = 0,279 \text{ cm}^2 \text{ por nervura}$$

A armadura adotada foi de duas barras de aço com espessura de 5.0mm por nervura.

Segundo Carvalho (2013), o ideal é que a laje nervurada não necessite de armadura de cisalhamento, isso é possível se a tensão de cisalhamento devida for menor que aquela resistida apenas pelo concreto.

Vsd é igual a reação de cada nervura nas vigas de apoio; para o carregamento total de 2,05 kN/m em uma nervura e vão de 2,85m, resulta:

$$Vsd = (2,05 \cdot 2,85) / 2 = 2,92 \text{ kN}$$

$$Tsd = (1,4 \cdot 2,92) / 0,07 \cdot 0,237 = 246,52 \text{ kN/m}^2$$

A resistência de projeto ao cisalhamento é dada por:

$$Trd1 = [Trd \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho)] \quad (18)$$

Onde,

$$Trd = 0,25 \cdot 0,21 \cdot \frac{fck^{\frac{2}{3}}}{1,4} \quad (19)$$

$$\rho = \frac{As1}{bw \cdot d} \quad (20)$$

$$k = 1,6 - d \quad (21)$$

Então,

$$\rho1 = 0,00168$$

$$k = 1,363$$

$$Trd = 320,62$$

$$Trd1 = 553,83 \text{ kN/m}^2$$

Portanto,  $Tsd$  é menor que  $Trd1$ , então não existe necessidade de armadura transversal. Foi adotada uma barra de aço com 5.0mm de espessura apenas para amarração.